

MIT MULTISCHICHT-LAUE-LINSEN ZUR HÖCHSTAUFLÖSENDEN RÖNTGENOPTIK

DIE AUFGABE

Die immer weiter fortschreitende Miniaturisierung der Mikroprozessoren erfordert auch verbesserte Untersuchungsverfahren. Mit Röntgenmikroskopie ist es möglich, kleine Strukturen quasi zerstörungsfrei und bei entsprechenden Aufbauten im Betrieb zu untersuchen, um Fehlstellen zu identifizieren und in Zukunft zu vermeiden. Der Einsatz von Röntgenstrahlung für die Analyse ermöglicht es, zusätzlich zur Absorption, Informationen über die Zusammensetzung der Elemente in einer Probe zu gewinnen.

Eine häufig genutzte Untersuchungsmethode ist die Vollfeldabbildung von Proben an laborbasierten Röntgenmikroskopieaufbauten. Des Weiteren kann der einfallende Parallelstrahl einer Synchrotronstrahlungsquelle genutzt werden, um durch Abrastern der Probe ein entsprechendes Bild zu bekommen.

Die Auflösung ist bei den Untersuchungen in erster Linie durch die verwendeten Optiken begrenzt. Zonenplatten und refraktive Röntgenlinsen bieten Abbildungseigenschaften mit Auflösungsvermögen besser als 100 nm. Strukturgrößen von in- zwischen unter 50 nm erfordern eine entsprechende Entwicklung. Insbesondere bei harter Röntgenstrahlung von 8 keV und mehr stoßen Zonenplatten bei der lithografischen Herstellung an Prinzip bedingte Grenzen, durch die sowohl die Effizienz als auch die Fokusgröße begrenzt sind.

Um mit aktuellen technischen Entwicklungen Schritt halten zu können, ist die Auflösung der Optiken weiter zu verbessern. Dies soll optimaler Weise erreicht werden, ohne den praktischen Einsatz des Aufbaus unnötig einzuschränken.

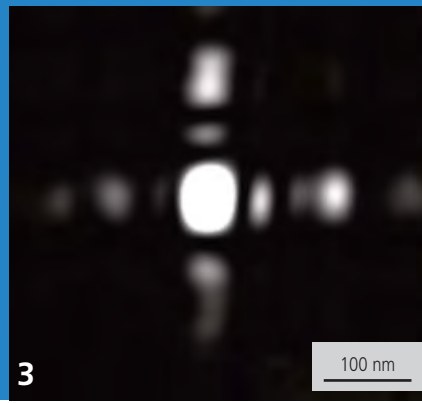
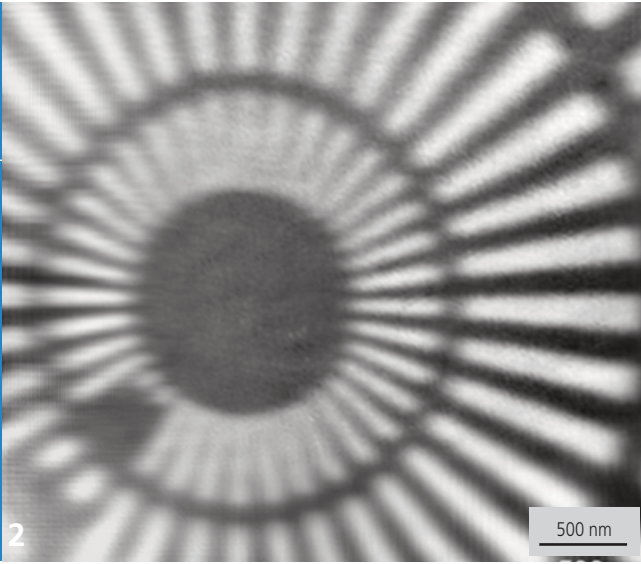
UNSERE LÖSUNG

Multischicht-Laue-Linsen machen sich das Prinzip der Röntgenbeugung zunutze und verbessern die technologischen Limitierungen der derzeit eingesetzten Fresnelschen Zonenplatten an entscheidenden Punkten. Da sich das Auflösungs- und Fokussierungsvermögen in der Größenordnung der kleinsten hergestellten Schichtdicken bewegt, müssen entsprechend dünne Schichten abgeschieden werden. Schichten mit 1 Nanometer Schichtdicke stellen das bisher errechnete Limit der Auflösung dar.

Um eine solche Linse herzustellen, ist es notwendig, tausende Schichten entsprechend dem Zonenplattengesetz mit zunehmenden Dicken abzuschneiden. Dabei kann sich die Gesamtdicke auf über 50 μm belaufen. Die notwendige Stabilität des Prozesses ist sicherzustellen und die Vorgabe der Schichtdicken sind präzise einzuhalten.

Im IWS Dresden wurden Zonenbreiten zwischen 5 nm und über 300 nm realisiert. Es werden hierbei keine vollständigen, sondern Teile halber Linsen auf einer Seite der optischen Achse hergestellt.

Die so erzeugte Beschichtung wird im Anschluss so präpariert, dass nur noch eine wenige Mikrometer dicke freistehende Lamelle übrigbleibt; dies ist die eigentliche Linse. Da es sich bei einem Element um eine linear fokussierende Linse handelt, werden zwei Linsen mit Glue Bonding fixiert und so eine punktfokussierende Optik gebildet.



ERGEBNISSE

Untersuchungen mit Multischicht-Lau-Linsen als fokussierende Optik erfolgten an der Synchrotronstrahlungsquelle in Hamburg sowie am ESRF in Grenoble, Frankreich. In den ersten Experimenten wurde eine Multischicht-Lau-Linse in gekreuzter Anordnung mit einer nanofokussierenden refraktiven Linse verwendet. Durch geschicktes Kombinieren, der aus dem Beugungsbild gewonnenen Informationen mit Hilfe der sogenannten ptychografischen Rekonstruktion, können nicht nur Informationen über die Struktur der untersuchten Probe erlangt werden. Auch das komplexe Wellenfeld der Optik sowie die Form des Fokus und die Kaustik werden mit bestimmt (Abb. 2).

In weiteren Experimenten mit der nächsten Linsengeneration wurden zwei Multischicht-Lau-Linsen gekreuzt und integrierte Schaltkreise und Proben für Nanostressmessungen untersucht. Mit den gekreuzten Multischicht-Lau-Linsen wurde bei 20 keV Röntgenenergie ein Punktfokus mit einer Größe von $39 \cdot 49 \text{ nm}^2$ (Abb. 3) und eine Beugungseffizienz von etwa 12 % erreicht. Die Beugungseffizienzen von Fresnel Zonenplatten liegt bei der verwendeten harten Röntgenstrahlung üblicherweise im niedrigen einstelligen Prozentbereich.

Ein Vergleich von theoretischen Berechnungen mit den Messergebnissen hat zu einem verbesserten Verständnis der während der Beschichtung variablen Parameter geführt. Ausgehend von der jeweils letzten Beschichtung kann so eine kontinuierliche Verbesserung der Kaustik und des Strahlprofils erreicht werden.

Weitere Experimente mit gekreuzten Multischicht-Lau-Linsen wurden an einem Laborröntgenmikroskop in Dresden durchgeführt. Hier konnte mit 8 keV Röntgenenergie zum ersten

Mal überhaupt eine Vollfeldabbildung mit Multischicht-Lau-Linsen realisiert werden. Dabei ist bereits eine mit konventionell eingesetzten Zonenplatten vergleichbare Auflösung sowie ein vergleichbarer Kontrast erreicht worden. Dies wird die Messzeiten aufgrund der Effizienzsteigerung reduzieren und die Auflösung der Röntgenmikroskopie aufgrund der herstellungsbedingten Vorteile verbessern.

Das Projekt wird durch den Freistaat Sachsen gefördert (FKZ 75694/2583). Das Fraunhofer IWS dankt dem Fraunhofer IZFP, dem Institut für Strukturphysik für kondensierte Materie der Technischen Universität Dresden sowie dem Industriepartner Globalfoundries für die Unterstützung bei der Entwicklung und Charakterisierung der Multischicht-Lau-Linsen.

- 1 *TEM-Bildausschnitt einer tiefengradierten Multischicht-Lau-Linse inklusive Substrat (re. unten) und Übergang zur Umgebung (li. oben)*
- 2 *Ptychografisch rekonstruiertes Phasenbild einer bei den Synchrotronversuchen verwendeten Testprobe mit kleinsten Strukturgrößen von 30 nm*
- 3 *Amplitude einer Linse, bestehend aus zwei senkrecht zueinander positionierten Multischicht-Lau-Linsen*

KONTAKT

Dipl.-Phys. Adam Kubec
 Telefon: +49 351 83391-3572
adam.kubec@iws.fraunhofer.de

