

DISS. ETH NO. 18878

**EXTREME ULTRAVIOLET HOLOGRAPHY FOR  
FABRICATION OF HIGH RESOLUTION FRESNEL  
ZONE PLATES**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

SANKHA SUBHRA SARKAR

Master of Science, Indian Institute of Science

Date of Birth 5th October 1981

Citizen of Republic of India

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Johannes Friso van der Veen, Examiner

Prof. Dr. Olivier J. F. Martin, Co-examiner

Dr. Christian David, Co-examiner

Dr. Harun H. Solak, Co-examiner

Year 2010

# Zusammenfassung

Dank grossen wissenschaftlichen Anstrengungen in den letzten Jahrzehnten liefert die Röntgenmikroskopie nun eine Vielzahl von Informationen zu Materialeigenschaften mit einer Auflösung von unter 100 nm. Röntgenstrahlen geben Aufschluss über elementare, chemische, strukturelle und magnetische Eigenschaften, die mit anderen Methoden in vielen Fällen nicht zugänglich sind. Fresnel Zonenplatten (FZP) sind weit verbreitet als Beugungslinsen in hochauflösender Röntgenmikroskopie. Eine FZP besteht aus einer Serie von konzentrischen Ringen aus Material, das Röntgenstrahlen absorbiert oder eine Phasenverschiebung bewirkt. Wenn eine Zonenplatte mit kohärentem Licht bestrahlt wird, entsteht in der Fokusebene ein heller Punkt durch konstruktive Überlagerung von Licht, das an den verschiedenen Zonen gebeugt wurde. Die Auflösung, d. h. die Grösse des Brennflecks hängt von der numerischen Apertur oder der Breite der äussersten Zone ab, welche die kleinste Struktur auf einer Zonenplatte ist. Üblicherweise werden Fresnel Zonenplatten mit Elektronenstrahl-Lithographie (ESL) angefertigt, wobei mit modernster Technik bereits Strukturen unter 20 nm hergestellt und eine vergleichbare optische Auflösung erzielt wurde. Schwierigkeiten bei der Produktion von dichten Strukturen, lange Expositionzeiten, die Reproduzierbarkeit und die Genauigkeit bei der Platzierung der Strukturen stellen allerdings noch grosse Herausforderung bei der Herstellung mit ESL dar.

Wir untersuchten holographische Techniken unter Verwendung extrem ultravioletter (EUV) Strahlung (Wellenlänge = 13.5 nm), die neue und vorteilhafte Wege zur Herstellung von hochauflösenden FZP bieten können. Zu diesem Zweck wurden speziell konstruierte Vorläuferstrukturen (genannt Maske) mit ESL hergestellt. Diese Masken werden dann für das Erzeugen von holographischen Abbildungen durch EUV Belichtung benutzt. Die Abbildungen werden in eine Photoresist-Schicht übertragen und weiterverarbeitet, um Tochter-FZP herzustellen, die wiederum in einem Röntgenmikroskop getestet werden. Unsere Herangehensweise stützt sich auf das erwiesene Potential von lithographischen Belichtungen im EUV Bereich zur Herstellung von Strukturen mit einer Auflösung von  $\sim 10$  nm. Der Zugang zu hochentwickelten Nanofabrikations-Einrichtungen mit ESL und Möglichkeiten zur Prozessierung, sowie eine einzigartige kohärente EUV Strahllinie an der Synchrotronquelle des Paul Scherrer Instituts (PSI) waren entscheidend für die Entwicklung der neuen holographischen Methoden.

In dieser Dissertation werden drei verschiedene holographische Techniken erörtert und

experimentell untersucht. Zum einen wurde das Interferenzmuster einer sphärischen Welle, ausgehend von einer kleinen kreisförmigen Apertur (Lochblende), und einer ebenen Welle mit vergleichbarer Intensität in eine Zonenplatte umgesetzt. Es wurde gezeigt, dass die Breite der äussersten Zone in Beziehung zum Durchmesser der Apertur steht. Die Grösse des Brennpunktes einer solchen Tochter-FZP wurde gemessen, sie ist vergleichbar mit dem Durchmesser der Vorläufer Lochblende. Eine Reihe von numerischen Simulationen wurde durchgeführt, um die Eigenschaften einer Wellenfront zu verstehen, die von einer zylindrischen Lochblende ausgeht. Es zeigte sich, dass die Transmission durch eine Lochblende für kleine Durchmesser stark reduziert wird, da die Bedingungen für eine Begrenzung der sich fortpflanzenden Welle in der Lochblende nicht mehr erfüllt sind. Zonenplatten mit  $\sim 50$  nm Zonenbreite konnten hergestellt werden, indem Lochblenden mit ähnlichem Durchmesser verwendet wurden. Die Anzahl Zonen auf der hergestellten FZP ist beschränkt durch die longitudinale Kohärenz der EUV Quelle. Durch eine Weiterentwicklung der Quelle und des Photoresists könnten mit dieser Technik grosse FZP hergestellt werden. Der Hauptvorteil dieser Technik liegt in der Verwendung einer perfekten sphärischen Wellenfront, die nicht von der genauen Form der Lochblende abhängt.

In einem zweiten Lösungsansatz wurde das Interferenzmuster von zwei sphärischen Wellen in eine Zonenplatte umgesetzt. Obwohl die Tochter-FZP ringförmig sind, ist diese Technik geeignet für die Herstellung von sehr hochauflösenden FZP, wobei bisher 16 nm Zonenbreite erreicht wurden. Abbildungen mit Raster-Transmissions-Röntgenmikroskopie (STXM) unter Verwendung einer der Tochter-FZP wurden erstellt.

Schliesslich wurde das achromatische Selbst-Abbildungs Prinzip (Talbot Effekt) eines periodischen Objekts erfolgreich auf Fresnel Zonenplatten angewendet, die quasi-periodische Strukturen enthalten. Die Masken wurden mit Hilfe von Berechnungen und numerischen Simulationen konstruiert. Vorläufer-ZP, die eine Phasenverschiebung bewirken und eine hohe Beugungseffizienz besitzen, wurden mit ESL hergestellt. Tochter-ZP mit der doppelten räumlichen Frequenz oder der halben Periode ihrer Vorläufer-ZP wurden erstellt. Ausgehend von einer Vorläufer-ZP mit einer Breite der äussersten Zone von 50 nm wurde eine Tochter-ZP mit einer Zonenbreite von bis zu 30 nm produziert.

Die Resultate dieser Studie zeigen neue Wege zur Herstellung von hochauflösenden FZP auf. In Bezug auf die Zonenbreiten sind die hergestellten Zonenplatten vergleichbar mit FZP, die mit ESL produziert wurden. Alle drei getesteten Methoden stützen sich auf Masken, die mit ESL produziert wurden. Mit Ausnahme der ersten Methode (Beugung durch eine Lochblende) ist die Produktion von Masken mit präziser Platzierung der Struktur notwendig. Sobald aber eine gute Maske vorhanden ist, können sehr viele frequenzmultiplizierte Tochter-FZP reproduzierbar und mit hohem Durchsatz hergestellt werden.

# Summary

Owing to considerable amount of scientific efforts over the past several decades, x-ray microscopy is now capable of providing us with a great deal of information on material properties with sub-100 nm scale resolution. X-rays provide information on elemental, chemical, structural and magnetic properties that in many cases is not available from other methods. Fresnel zone plates (FZPs) are widely used as diffractive lenses in high-resolution x-ray microscopy. An FZP consists of a series of concentric rings of an absorbing or phase shifting material. When illuminated with coherent radiation, a zone plate forms a bright spot at its focus by constructive superposition of the light diffracted from each zone. The resolution or the focal spot size depends on the numerical aperture or equivalently on the width of the outermost zone, the smallest feature on a zone plate. Conventionally Fresnel zone plates are fabricated using electron-beam lithography (EBL) and with state-of-the-art technology sub-20 nm feature size and comparable optical resolution have been demonstrated. However, difficulties associated with the fabrication of dense patterns, long exposure times, reproducibility and pattern placement accuracy remain as major challenges for EBL fabrication.

We have studied holographic techniques using extreme ultraviolet (EUV) radiation (wavelength = 13.5 nm), that may offer new and advantageous ways for fabrication of high-resolution Fresnel zone plates. For this purpose, specially designed parent patterns (called the *mask*) are first fabricated using EBL. These masks are used to produce holographic images by EUV exposure. The images are recorded in a resist layer and processed to fabricate *daughter* zone plates which are tested in an x-ray microscopy setup. Our approach relies on the proven potential of lithographic exposures in the EUV range to create  $\sim 10$  nm scale patterns. Availability of advanced nano-fabrication facilities including EBL and processing tools and a unique synchrotron-based coherent EUV beamline at the Paul Scherrer Institut (PSI) have been critical in testing the new holographic methods.

In the present dissertation, three different holographic techniques are discussed and experimentally demonstrated. In the first approach, interference pattern of a spherical wave, diffracted from a small circular aperture (pinhole), and a plane wave of comparable intensity is recorded as a zone plate. It will be shown that the outermost zone width is related to the diameter of the aperture. The focal spot size of such a daughter zone plate is measured and shown to be comparable to the parent pinhole diameter. A set of

numerical simulations has also been carried out to understand the nature of the wavefront diffracted from a cylindrical pinhole. It has been shown that the transmission through a pinhole is severely reduced for small diameters as the conditions for confinement of a propagating wave inside the pinhole are no longer satisfied. Zone plates with  $\sim 50$  nm zone width have been achieved using pinholes of similar diameter. The number of zones of the obtained zone plate is limited by the longitudinal coherence of the EUV source. With further development of the source and the recording medium, the technique may offer a way to fabricate large Fresnel zone plates. The main advantage of the technique is its use of a perfect spherical wavefront which does not depend on the precise shape of the pinhole.

In a second approach, interference pattern of two spherical waves has been recorded as a zone plate. Although the daughter zone plates are annular in shape, the technique is suitable for very high resolution Fresnel zone plate fabrication, with 16 nm zone width achieved so far. Scanning transmission x-ray microscopy (STXM) image using one of the daughter zone plates has also been presented.

Finally, achromatic self imaging principle (*Talbot effect*) of a periodic object has been successfully extended to Fresnel zone plates, which comprise quasi-periodic patterns. Parent masks were designed through calculations and numerical simulations. Phase-shifting parent zone plates with high diffraction efficiency were fabricated with EBL. Daughter zone plates with double the spatial frequency or half the period of their parent counterparts were recorded. Starting with a parent mask with 50 nm outermost zone width, a daughter zone plate with zone width down to 30 nm has been achieved.

The results obtained in this study demonstrate new ways to fabricate high-resolution Fresnel Zone plates. The obtained results are comparable to the EBL fabricated zone plates in terms of zone width. All three methods tested rely on EBL made masks. Except for the first one (pinhole diffraction) the other methods require fabrication of masks with precise pattern placement. However, once a *good* mask is obtained many more frequency-multiplied daughters can be fabricated in a reproducible and high-throughput way.