

# Lithographie der nächsten Generation für die Mikrooptik



Uwe D. Zeitner



E.-Bernhard Kley<sup>1</sup>

Die Entwicklung von Lithographieanlagen wird hauptsächlich durch die Road-Map der Mikroelektronik vorangetrieben. In /1/ ist ein umfassender Überblick über die Auswirkungen dieser Entwicklung auf die Mikrooptik-Fabrikation zu finden. Die dort beschriebene Analyse zeigt, dass die Anforderungen der Mikroelektronik an die Lithographie nicht immer zu denen aus der Mikrooptik entstehenden passen. Um die modernsten lithographischen Technologien auch für optische Anwendungen nutzbar zu machen, sind demzufolge speziell angepasste Lithographieanlagen erforderlich. Das IOF hat sich der Weiterentwicklung der lithographischen Technologie für die Optik zusammen mit den Herstellern solcher Anlagen verschrieben. Worin bestehen nun die speziellen Anforderungen der Optik an die Lithographie?

Zunächst sind die in der Optik auftretenden lateralen Strukturgeometrien in den meisten Fällen nicht an die kartesische Orientierung der Strukturen aus der Mikroelektronik angepasst und die Oberflächenprofile sind oft nicht nur binär, sondern haben eher einen kontinuierlichen Verlauf. Beispiele mikrostrukturierter optischer Elemente sind u.a. binäre oder geblazte Gitter, Mikrolinsenarrays, computergenerierte Hologramme und Phasenplatten /2/. Die daraus resultierende Flexibilität hinsichtlich lateraler Kontur und Profilform stellt eine große Herausforderung für die Herstellungstechnologie dar. Hinzu kommen hohe Anforderungen an die laterale Positioniergenauigkeit der Mikrostrukturen, die sich von denen der Mikroelektronik unterscheiden. Auch in Fällen lokaler Strukturgrößen von wenigen Mikrometern können die Gesamtabmaße der Elemente in der Optik 100 mm oder darüber betragen.

Während in der Mikroelektronik Skalierungsfehler nur für aufeinander folgende Herstellungsschritte relevant sind, nicht jedoch die elektrische Funktion beeinflussen, wird in der Optik die erreichbare Wellenfrontgenauigkeit durch solche Fehler signifikant beeinflusst. Diese wird auch durch die absolute Position der Strukturen auf gegenüberliegenden Seiten eines Elements bestimmt. In der Optik folgt daraus eine globalere Anforderung an die Positioniergenauigkeit.

Das Streben nach höchster Positioniergenauigkeit wird im Falle mehrstufiger optischer Oberflächenprofile besonders wichtig. Für deren Herstellung wird häufig die so genannte Binäre-Optik-Technologie eingesetzt /3/. Diese erfordert die Überlagerung verschiedener lithographischer Belichtungen. Um dabei eine optimale Funktion zu realisieren, muss deren Überdeckung deutlich genauer als 1/10 der lokalen Strukturperiode sein. Für Perioden in der Größenordnung von wenigen Mikrometern erreicht man das nur mit Überdeckungsfehlern deutlich unter 100 nm.

Für die Realisierung von Elementen mit geringen Wellenfrontfehlern ist weiterhin die Nutzung von Substraten erforderlich, die keine Deformationen oder Verbiegungen unter Einsatzbedingungen zeigen. Dies kann durch ausreichende Dicke der Substrate gewährleistet werden. Auch für diese Anforderung sind Modifikationen der Lithographieanlagen erforderlich, damit solche für die Mikroelektronik ungewöhnlichen Substrate bearbeitet werden können.

<sup>1</sup> Institut für Angewandte Physik, Friedrich-Schiller-Universität Jena

The development of lithography tools is mainly driven by the road-map of micro electronics. A comprehensive overview about the consequences of this situation on micro-optics fabrication is given in /1/. From the discussion given there it is apparent that the micro-electronics requirements on the lithography tools do not always perfectly fit to the ones arising from micro-optics. Thus, in order to use the cutting edge lithographic technologies for optical applications specially adapted tools are required. The IOF has committed itself to push the development of such tools together with appropriate lithography system developers. But what are the special demands of optics on lithography or on the lithography tool?

First of all the lateral structure geometries in optics are in most cases not well adapted to the Cartesian-oriented structures of micro-electronics and the height profiles are often not only binary but more or less continuous. Examples of micro-structured optical elements are binary or blazed gratings, microlens arrays, computer generated holograms and phase plates etc. /2/. As a consequence the fabrication requires a challenging patterning flexibility with respect to lateral contour and profile shape which, at the same time, is accompanied by tight requirements on positioning accuracy slightly different from the ones in micro-electronics.

This results from the size a single element may have in optics. Even in cases in which the local feature size has dimensions of micrometers, overall extensions of the element in the range of 100 mm or above are common. While in micro-electronics a scaling error is only relevant for subsequent fabrication steps but does not influence the electrical function in optics such an error may have serious influence on the wave front accuracy of the optical function. The wave front accuracy is determined by the absolute position of structures located on different sides of the element and thus, in optics there are applications which have a more global demand on the positioning accuracy.

The quest for highest positioning accuracy becomes of particular importance for non-binary optical structures which are the majority of cases. For the fabrication of such structures often the so called binary optics technology is used /3/. This technique requires the overlay

of different lithography layers. In order to maintain optimal performance the overlay accuracy has to be much less than 1/10 of the local grating period. For local periods in the range of a few micrometers the resulting overlay accuracy should thus be considerably below 100 nm. An extreme effort is required to achieve this value over the whole area covered by the element.

In order to realize elements with low wave-front error it is furthermore essential that the substrates do not show undesired bowing within the used area during their application. This can be managed only by using substrates having a substantial larger thickness compared to the ones used in micro electronics. To make them fit into the lithography machine special adaptations have to be made.

Abb 1:  
50 keV-Elektronensäule (links) und Beladestation (rechts) der SB350 OS.

Fig. 1:  
50 keV electron column (left) and loading area (right) of the SB350 OS.



Nicht zuletzt sind optische Oberflächen in der Regel nicht planar, und die Integration von Mikrostrukturen auf gekrümmten Oberflächen ist von großem Interesse. Ein sehr wichtiger Punkt ist aber, dass die Kombination verschiedener optischer Funktionen in einer Oberfläche die Anzahl der erforderlichen Elemente in einem optischen System und damit dessen Größe, Justageaufwand und Preis verringert. Ein bekanntes Beispiel für eine Struktur, die Nutzen aus einer derartigen Integration ziehen würde, ist eine refraktiv/ diffraktive Hybridlinse für eine farb- und aberrationskorrigierte Optik. Ein Verfahren zum Herstellen von Mikrostrukturen auf nicht-planaren Oberflächen mit einem speziell entwickelten Laserlithographiesystem wurde bereits in unserem Jahresbericht 2004 vorgestellt /4/.

Die vorstehende Diskussion zeigt, dass die standardmäßige lithographische Herstellung von Mikrostrukturen auf dünnen planaren Substraten nicht in allen Fällen ideal für die Herstellung optischer Elemente ist. Das führt zu einer technologiebezogenen Einschränkung der Nutzung mikrooptischer Elemente. Um diese Einschränkungen zumindest teilweise zu überwinden, wurde das Elektronenstrahl-Lithographiesystem Vistec SB350 OS von der Vistec Electron Beam GmbH in Jena entwickelt, das speziell an die Anforderungen optischer Anwendungen angepasst wurde. Dabei stehen die Buchstaben OS im Systemnamen für »Optics Special«. Dieses Elektronenstrahlssystem wurde 2006 in einer komplett neuen Reinraumanlage im IOF installiert. Dort ist auch die benötigte technologische Grundausstattung für die Arbeit mit Elektronenstrahl-Lacken und das Ionenstrahlätzen vorhanden.

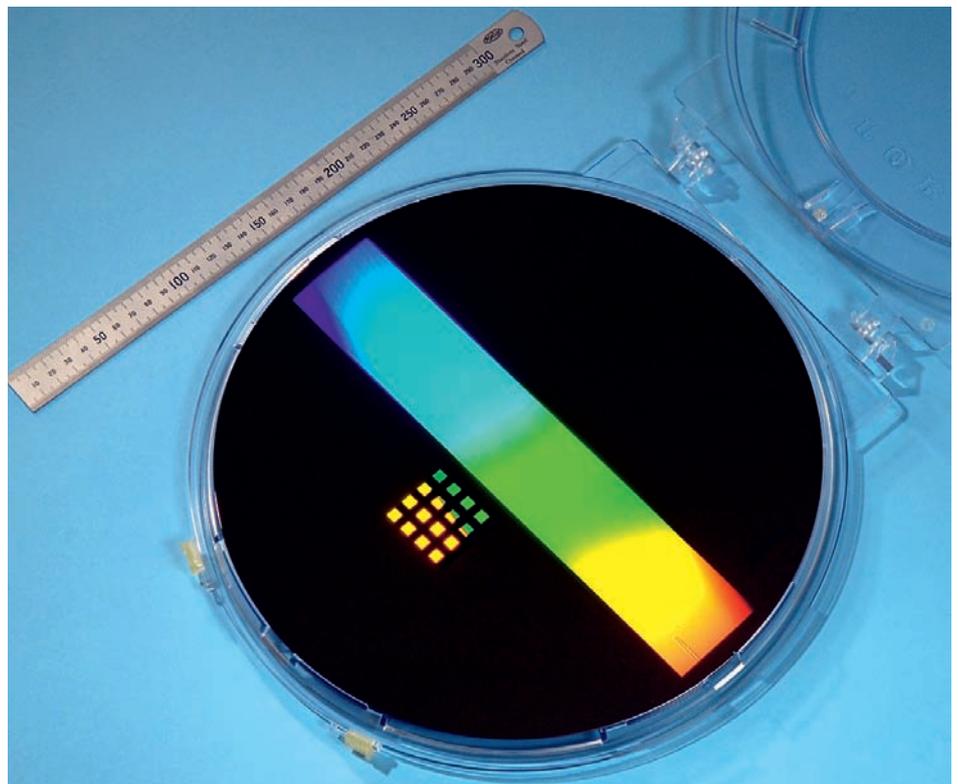


Abb. 2:  
Großes binäres Gitter (280 mm x 50 mm,  
1  $\mu\text{m}$  Periode) auf einem 12"-Siliziumwafer.

Fig. 2:  
Large binary grating (280 mm x 50 mm,  
1  $\mu\text{m}$  period) on a 12" silicon wafer.

Last but not least, optical surfaces are usually not planar and the integration of microstructures on curved surfaces is of great interest. Most importantly the combination of different optical functions into one surface will reduce the number of elements in an optical system and therefore its size, adjustment effort, and price. A prominent example of a structure which would benefit from such integration is a refractive/diffractive hybrid lens for color- and aberration corrected optics. A method to realize micro-structures on non-planar surfaces by a specially developed laser-lithography system has been previously reported in our 2004 Annual Report /4/.

restriction of the use of micro-optical elements. In order to overcome these restrictions at least partially the electron beam lithography system Vistec SB350 OS (Vistec Electron Beam GmbH, Jena) has been developed which is specially adapted to requirements of optical applications. The letters OS stand for "optics special". This e-beam writer has been installed in 2006 in a complete new clean room facility at the IOF. There also the required accompanying technological basis for e-beam resist treatment and ion-beam etching is available. The whole technology chain is capable to handle substrate sizes up to 310 mm extension and 15 mm thickness.

The above discussion shows that the standard lithographic micro-structure generation on thin planar substrates is not in all cases ideally adapted to the fabrication of optical elements. The consequence is a technology related

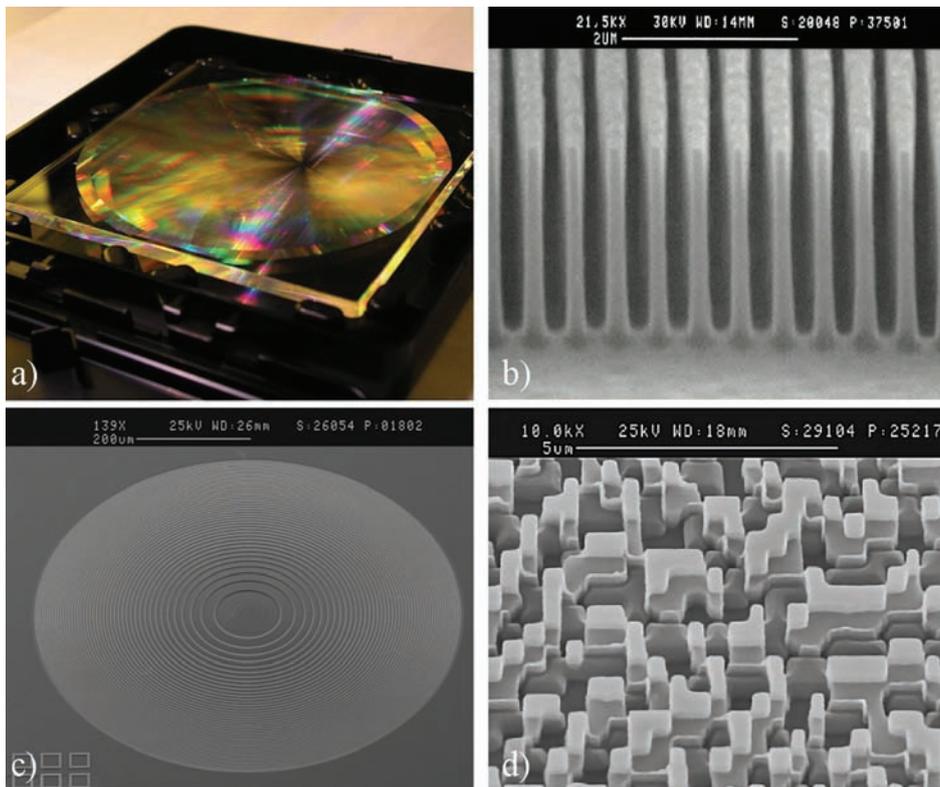


Abb. 3:  
 (a) Computer-generiertes Hologramm für Asphärentests,  
 (b) 2  $\mu\text{m}$  tief in Quarzglas geätztes Gitter mit 440 nm Periode,  
 (c) diffraktive Farbkorrekturlinse für einen Blu-ray DVD-pick-up Kopf,  
 (d) 4-stufiges diffraktives Element.  
 Alle Strukturen sind in Quarzglas geätzt.

Fig. 3:  
 (a) Computer-generated hologram for asphere tests,  
 (b) 440 nm period grating 2  $\mu\text{m}$  deep etched in fused silica,  
 (c) diffractive color correction lens for a Blue-ray DVD-pick-up head,  
 (d) 4-level diffractive element.  
 All structures are etched in fused silica.

Die gesamte Technologiekette kann Substrate mit einer Größe von bis zu 310 mm und einer Dicke von 15 mm verarbeiten.

Das Herz der neuen Anlage ist natürlich das Elektronenstrahlsystem SB350 OS. Mit diesem Gerät kann eine sehr hohe Überdeckungs Genauigkeit der lithographischen Schichten und eine hohe Schreibgeschwindigkeit für mikro- und nanooptische Anwendungen erreicht werden. Die wichtigsten Parameter der SB350 OS sind:

- 50 keV Elektronenenergie,
- Schreibverfahren: variable shaped beam, Zellenprojektion,
- Minimale Strukturgröße < 50 nm,
- Adressraster: 1 nm,
- Stitching und Overlay in einer Schicht < 18 nm,
- Overlay-Genauigkeit (Mask to Mean) < 12 nm.

Abbildung 1 zeigt die Elektronensäule und die Beladestation der SB350 OS.

Um einen sehr hohen Durchsatz zu erreichen, ist ein Zellprojektionsmodus vorgesehen, der ein extrem schnelles Schreiben linearer Gitter ermöglicht. Beispielsweise kann eine Fläche von 100 mm x 100 mm mit einem Gitter mit Perioden von 1 µm, 500 nm oder 200 nm und Zweifachbelichtung innerhalb von 1,5 Stunden geschrieben werden. In diesem Zellprojektionsmodus sind für die Gitterausrichtung vier verschiedene Richtungen (0°, 90° und ± 45°) möglich. Abbildung 2 zeigt ein Gitter mit 1 µm Periode, das mit diesem Modus auf einen 12"-Wafer geschrieben wurde. Die Gitterausdehnung beträgt 280 mm x 50 mm. Ein wichtiger Anwendungsbereich für Gitter mit einer so großen Fläche sind Stretcher-Compressor-Anordnungen für die Manipulation ultrakurzer Laserpulse. Dabei sind die Wellenfrontgenauigkeit, die Größe und der

Beugungswirkungsgrad die wichtigsten Parameter. Es wurden bereits Gitter in Quarzglas mit einem Beugungswirkungsgrad von mehr als 98 % hergestellt.

Abbildung 3 zeigt weitere Beispiele für Strukturen, die mit Elektronenstrahl schreiben und dazugehörigen Techniken wie beispielsweise Trockenätzen oder Replikation hergestellt worden sind. Abgebildet sind großflächige CGH zum Asphärentest, dielektrische Retarder-Gitter mit hohem Aspektverhältnis und verschiedene mehrstufige diffraktiv optische Elemente für Wellenfront- und Farbkorrektur oder Musterprojektion.

Als neue Option ist auch eine Mischung aus Elektronenstrahl- und Laserlithographie möglich. Damit ist eine Herstellung von optischen Mikrostrukturen mit unterschiedlichen Detailgrößenklassen auf einem Substrat oder sogar in einem einzigen optischen Element möglich. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel, bei dem elektronenstrahlgeschriebene Gitter mit Perioden unter einem Mikrometer und lasergeschriebene geblazte Gitter mit einer Periode von 15 µm und einer Tiefe von 5 µm miteinander kombiniert wurden.

#### Literatur:

- /1/ Schnabel, B.; Microlithographic Pattern Generation for Optics, in *Microoptics – From Technology to Applications*, J. Jahns, K.-H. Brenner eds., Springer, 2004.
- /2/ Gale M.T.; Direct Writing of Continuous-relief Micro-optics, in *Micro-Optics*, H.P. Herzig, ed. (Taylor & Francis, London, 1997).
- /3/ Stern M.; An overview of binary optics process technology, in *Tech. Digest of the Conference on Diffractive Optics: Design, Fabrication, and Applications*, S. 334-337, OSA, 1994.
- /4/ Zeitner U.D.; Gräßler C.; Laser-Lithographie für Mikrooptik auf gekrümmten Oberflächen, IOF-Jahresbericht 2004, S. 32-33.

The core of the new facility is of course the electron-beam system SB350 OS. With this machine it is possible to achieve a very high overlay accuracy of lithographic layers and high writing speed for micro- and nano-optical applications. The most important parameters of the SB350 OS are

- 50 keV electron energy,
- writing strategy: variable shaped beam, cell projection
- minimum feature size < 50 nm,
- address grid: 1 nm,
- stitching and overlay in one layer < 18 nm,
- overlay accuracy (mask to mean) < 12 nm.

Figure 1 shows the electron column and the loading area of the SB350 OS.

For very high throughput a cell-projection mode is implemented that allows ultra-fast writing of linear gratings.

As an example a 100 mm x 100 mm area can be filled with a grating of 1  $\mu\text{m}$ , 500 nm, or 200 nm period and 2 paths writing within 1.5 hours. Four different orientations ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ , and  $\pm 45^\circ$ ) for the grating direction are available in this cell projection mode. A 1  $\mu\text{m}$  period grating written with this cell-projection mode on a 12" diameter wafer is shown in Fig. 2. Its lateral extension is 280 mm x 50 mm. An important application of such large area gratings are stretcher-compressor arrangements for ultra-short laser pulse manipulation. There the wave-front accuracy, size, and diffraction efficiency are the most important parameters. Gratings in fused silica with efficiencies above 98 % have been demonstrated.

Other prominent examples of structures fabricated by e-beam writing and accompanying technologies such as dry etching or replication are shown in Fig. 3. To be seen are large area null-test CGHs for asphere testing, high aspect ratio dielectric retarder gratings, and different multi-level diffractive optical elements for wave-front and color correction or pattern projection.

As a new option also a mix-and-match between electron beam lithography and laser lithography is possible. Thus, the fabrication of optical micro-structures of different feature size classes on one substrate or even in one optical element is possible. An example is shown in Fig. 4. There electron beam written sub-micron period gratings have been combined with laser written blazed gratings of 15  $\mu\text{m}$  period and 5  $\mu\text{m}$  depth.

References:

- /1/ Schnabel, B.: Microlithographic Pattern Generation for Optics, in *Microoptics – From Technology to Applications*, Jahns, J.; Brenner, K.-H. eds., Springer, 2004.
- /2/ Gale, M. T.: Direct Writing of Continuous-relief Micro-optics, in *Micro-Optics*, Herzig, H. P. ed. Taylor & Francis, London, 1997.
- /3/ Stern, M.: An overview of binary optics process technology, *Tech. Digest of the Conference on Diffractive Optics: Design, Fabrication, and Applications*, pp 334-337, OSA, 1994.
- /4/ Zeitner, U. D.; Gräßler, C.: Laser-lithography for micro-optics on curved surfaces, *IOF Annual Report 2004*, pp. 32-33.

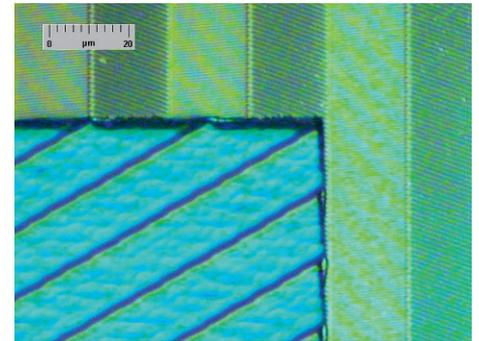


Abb. 4: Kombination von Elektronenstrahl- und Laserlithographie für die Herstellung verschiedener Strukturgrößen in einem einzelnen optischen Element.

Fig. 4: Combination of electron beam and laser lithography for fabrication of different structure classes in a single optical element.