



COMPUTERGENERIERTE HOLOGRAMME BASIEREND AUF NANOSTRUKTUREN

COMPUTER GENERATED HOLOGRAMS BASED ON NANOSTRUCTURES

Diffraktive optische Elemente wie computergenerierte Hologramme (CGHs) besitzen die Fähigkeit aus einer bekannten einfallenden Lichtwelle eine vorgegebene optische Feldverteilung zu generieren. Dadurch ergibt sich ein vielseitiger Einsatz dieser Elemente in der modernen Optik, beispielsweise zur interferometrischen Prüfung von hochgenauen Oberflächen bis in den sub-nm-Bereich oder für verschiedene Aspekte der Strahlformung und Strahlteilung.

Durch die Oberflächenstrukturierung eines konventionellen diffraktiven Elements entsteht eine lokale Phasenverzögerung der Welle, die proportional zur Höhe der im dielektrischen Material erzeugten Struktur ist. Da die Phase einer Welle im Bereich zwischen Null und der Wellenlänge definiert ist, wird die größte notwendige Höhenstufe durch eine Phasenverzögerung um die Lichtwellenlänge gegeben. Typische diffraktive Elemente besitzen daher eine lokal periodische Struktur, deren maximale Höhe im Bereich der Wellenlänge liegt.

Die hochentwickelte Herstellungstechnologie am Fraunhofer IOF und am Institut für Angewandte Physik (IAP), deren Kernstück die Elektronenstrahlolithographieanlage Vistec SB350 OS bildet, ermöglicht eine präzise Fertigung binärer, also auf zwei Höhenstufen basierender, Strukturen bis in den nm-Bereich /1/.

Diffraction optical elements like computer generated holograms (CGHs) have the ability to transform a known incident wave-front in a specific optical field distribution. This offers many applications in modern optics like interferometric testing of high-precision optical surfaces in the nanoscale range or for various tasks of beam shaping and beam splitting.

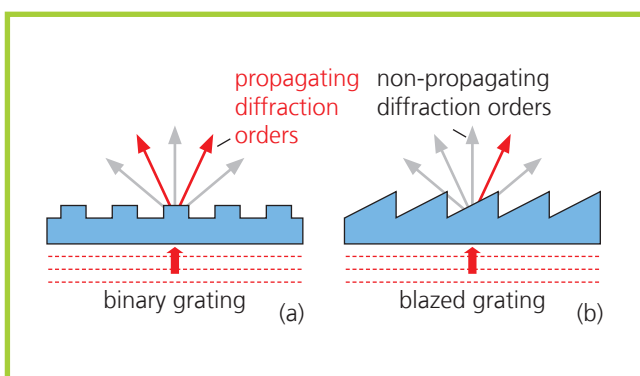
The generated surface relief of a conventional diffractive element creates a local phase delay which is proportional to the height profile of the dielectric optical element. Since the phase of a light wave is defined between zero and the wavelength, the maximum required structural height depends on the phase delay given by the wavelength. This limits the structural height of such elements due to a local periodicity of the surface relief.

Based on modern micro-structuring technology at the Fraunhofer IOF and at the Institute of Applied Physics (IAP), which includes an electron-beam lithography system SB350 OS (Vistec) as a central part, a precise fabrication of binary (with two height levels) nanostructures is possible /1/.

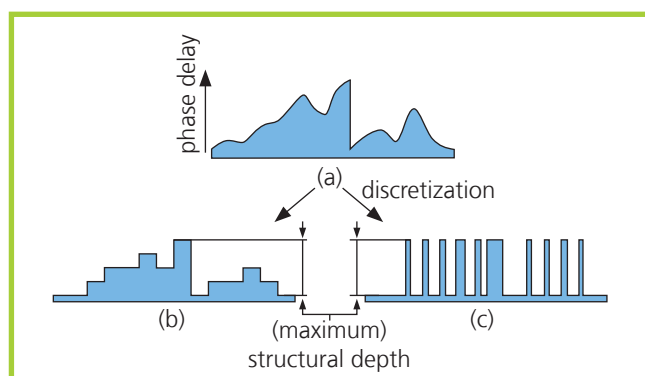
¹ *Transmissions-CGH basierend auf Subwellenlängenstrukturen. / Transmission CGH based on subwavelength structures.*

Allerdings ist die theoretische Effizienz binärer Phasenstrukturen limitiert. Wie bei binären Beugungsgittern (Abb. 2a), bei denen es aufgrund ihrer symmetrischen Form zu spiegelgleich propagierenden Beugungsordnungen kommt, treten bei den komplexeren CGH-Strukturen unerwünschte Spiegelbilder auf (Abb. 5a). Um die Effizienz in einer Bildordnung zu konzentrieren, muss das Phaselement eine asymmetrische Struktur mit möglichst vielen, idealerweise kontinuierlich verlaufenden, Höhen- bzw. Phasenstufen besitzen, wie das in Abb. 2b schematisch für ein so genanntes Blaze-Gitter gezeigt ist. Dieser Ansatz lässt sich analog auf CGH-Strukturen übertragen. Durch komplexe Simulationen wird eine quasi kontinuierliche Phasenfunktion des CGH erzeugt (Abb. 3a). Diese Funktion kann bisher in einem aufwendigen technologischen Prozess mit einer geringen Anzahl von Höhenstufen realisiert werden (Abb. 3b).

However, the diffraction efficiency of conventional binary phase-only diffractive elements is theoretically limited. Similar to binary diffraction gratings (Fig. 2a), which create symmetric diffraction orders due to its symmetric shape, so-called twin-images occur by more complex CGH structures (Fig. 5a). To focus the efficiency of the incident light wave in one diffraction order, an asymmetric structure with an increasing number of height or phase levels is necessary. That implies in the best case an almost continuously shaped structure as shown schematically in Fig. 2b for a so-called blazed grating. This approach can be applied by analogy on CGH phase structures. The quasi-continuous phase function of the CGH (Fig. 3a) is calculated by computer. Up to now, this phase function was converted in a small number of height levels (Fig. 3b) by an expensive and time-consuming fabrication process.

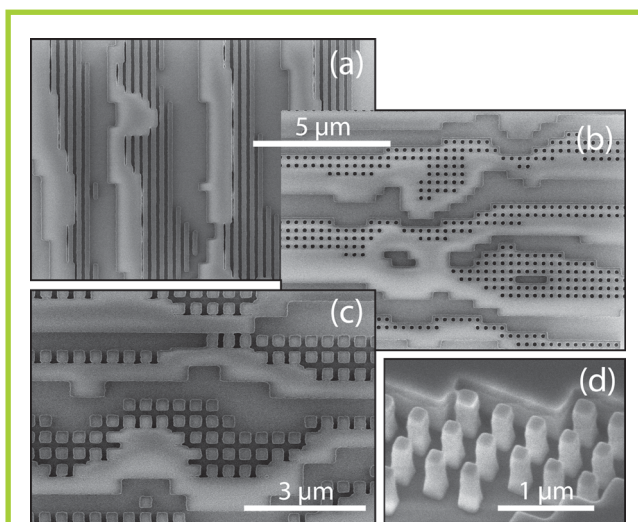


2 *Beugung des Lichts an einem symmetrischen binären Gitter mit spiegelgleichen Beugungsordnungen (a) und an einem Blaze-Gitter mit asymmetrischem Beugungsverhalten (b). / Light diffraction at a symmetric binary grating with symmetric diffraction orders (a) and at a blazed grating with an asymmetric diffraction behavior (b).*



3 *Diskretisierung einer berechneten Phasenfunktion (a) in konventionelle Höhenstufen (b) und mittels binärer Subwellenlängenstrukturen (c). / Quantization of a continuous phase function (a) in multi-height-levels (b) and in binary sub-wavelength structures (c).*

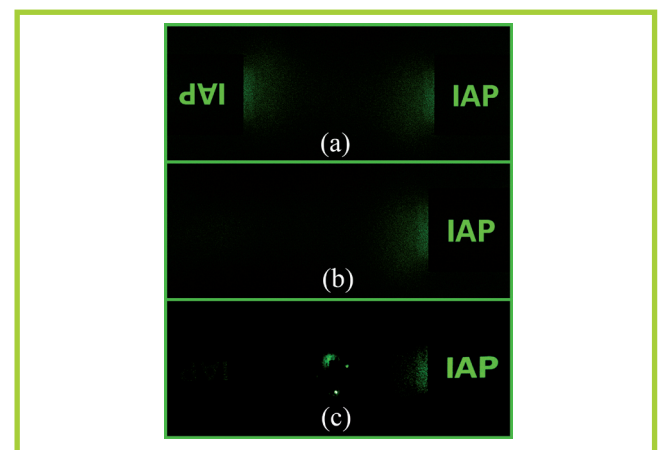
Mit dem vorgestellten Ansatz lassen sich die Vorzüge der binären Technologie mit der Möglichkeit der Realisierung nahezu kontinuierlicher Phasenverläufe kombinieren. Folglich kann der Technologieprozess, unabhängig von der Anzahl der Phasenstufen, auf einen Belichtungs- und einen Ätzschritt reduziert werden. Der Einsatz so genannter Subwellenlängenstrukturen (SWSs) zur Erzeugung eines graduellen Phasenverlaufes wurde bereits bei analytisch beschreibbaren diffraktiven optischen Elementen wie Blaze-Gittern [2,3] erfolgreich untersucht. Dieser Ansatz ist für die Realisierung von nahezu statistischen CGH-Strukturen weiterentwickelt worden. Durch eine Variation der lateralen Ausdehnung der SWSs lässt sich eine beliebige Phasenverteilung generieren (Abb. 3c). Je nach Anwendungsfall ist die Nutzung unterschiedlicher Strukturen, wie Säulen, Löcher oder Stege, denkbar (Abb. 4).



4 Rasterelektronenmikroskopaufnahmen verschiedener binärer Subwellenlängenstrukturen. / Scanning-electron micrograph of the different subwavelength structures.

The present approach combines the advantages of a binary fabrication process with the possibility of creating almost continuously shaped phase modulations. The fabrication process is consequently reduced to one exposure and one etching step, completely independent of the number of phase levels. Using so-called subwavelength structures (SWSs) to realize a gradual phase distribution has already been demonstrated for analytical phase functions like those of blazed gratings [2,3]. This approach has been further developed for almost statistic CGH structures.

By changing the lateral expansion of the SWS, a variable phase distribution can be generated (Fig. 3c). Depending on the application, different structures like pillars, holes and ridges are available (Fig. 4).



5 Errechnete Fernfeldverteilung eines binären CGH, gekennzeichnet durch das Auftreten eines Spiegelbildes (a). Berechnete (b) und gemessene (c) Feldverteilung eines reflektiven CGH basierend auf dem vorgestellten Ansatz. / Calculated far-field distribution of a conventional binary CGH denoted by twin-image generation (a). Calculated (b) and measured (c) field distribution of a reflective CGH based on subwavelength structures.

Erste diffraktive Elemente in Reflexion (Abb. 4a-c) und Transmission (Abb. 1, 4d) konnten bereits erfolgreich hergestellt werden. Abbildung 5 zeigt exemplarisch die generierte optische Fernfeldverteilung eines reflektiven CGH für die Designwellenlänge 532 nm. Die unerwünschte Spiegelverteilung wie auch die 0. Ordnung konnten jeweils bis auf 1 % unterdrückt werden.

Die Autoren danken dem BMBF für die finanzielle Unterstützung der Arbeiten (FKZ 13N9712 und 13N9433).

Based on the presented approach, first diffractive reflection (Fig. 4a-c) and transmission (Fig. 1, 4d) elements are successfully fabricated. For demonstration, a generated optical far-field distribution for a reflective CGH designed for 532 nm is shown in Fig. 5. The twin-image and the zeroth-order generation could be both reduced to 1 %.

The authors acknowledge the financial support for this work from the BMBF (project FKZ 13N9712 and 13N9433).

Literatur/References

/1/ Zeitner, U. D.; Kley, E.-B.: Lithographie der nächsten Generation für Mikrooptik, IOF Jahresbericht 2006, S. 38.

/2/ Farn, M. W.: Binary gratings with increased efficiency, Appl. Opt. 31, 4453-4458 (1992).

/3/ Kley, E.-B.; Freese, W.; Zeitner, U. D.; Michaelis, D.; Kämpfe, T.; Erdmann, M., Tünnermann, A.: Large-Scale Application of Binary Subwavelength Structures, Proc. IEEE/LEOS ThA4, Aug. 2009.

AUTHORS

Wiebke Freese¹

Thomas Kämpfe¹

Ernst-Bernhard Kley¹

Uwe Detlef Zeitner

Dirk Michaelis

*¹Institut für Angewandte Physik,
Friedrich-Schiller-Universität Jena*

CONTACT

Dr. Ernst-Bernhard Kley

Phone +49 3641 947-830

ernst-bernhard.kley@uni-jena.de