

Herstellung und Charakterisierung mehrstufiger strahlungsresistenter Diffraktiv Optischer Strahlteiler für die Lasermaterialbearbeitung

J.Schmitt*, F.Völklein*, Ch.Bischoff**, U.Rädel**, M.Wolz***, A.Meier*, U.Wallrabe****

* IMtech, Hochschule RheinMain, Rüsselsheim

** TOPAG Lasertechnik GmbH, Darmstadt

*** GD Optical Competence GmbH, Sinn

**** University of Freiburg, Dept. of Microsystems Engineering, Freiburg

<mailto:j.schmitt@imtech-fhw.org>

Mit Diffraktiv Optischen Elementen können Laserstrahlprofile optimal an die zu erfüllende Aufgabe angepasst werden. Durch hohen Fertigungs- und Messaufwand sind die dazu benötigten Glaselemente teuer. Die Kosten sollen durch ein neu entwickeltes isothermes Heißprägeverfahren minimiert werden.

1 Einführung

Diffraktiv Optische Elemente können nahezu jede beliebige Lichtverteilung erzeugen. In der Lasermaterialbearbeitung wird es somit möglich das Laserprofil optimal an die Aufgabe anzupassen. Das Aufspalten eines Laserstrahls in ein- oder zweidimensionale Arrays mit Hilfe eines Strahlteilers steigert beispielsweise die Produktivität.

Wegen der hohen Energien der Bearbeitungslaser kommen für die DOEs meist nur Gläser als Substratmaterial in Frage. Bei fotolithographischer Kontaktbelichtung werden kontinuierliche Strukturprofile mit Hilfe von Stufen angenähert. Das kann nur durch mehrere Prozessdurchläufe erreicht werden. Die direkte Strukturierung ist somit zeitaufwändig und führt zu hohen Kosten.

Durch die Entwicklung eines neuen isothermen Heißprägeverfahrens wird die Replikation von DOEs in Glas möglich. Bei dem Verfahren muss nur das Stempelwerkzeug fotolithographisch hergestellt werden. Beim Prägen wird es zusammen mit dem Glas auf eine Temperatur über 500°C erhitzt und mit einem Druck von rund 100N in Stickstoffatmosphäre abgeprägt (Abb. 1).

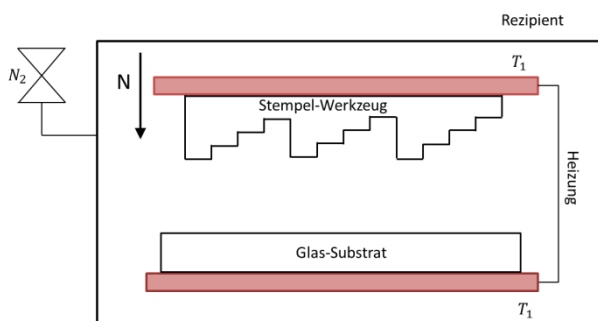


Abb. 1 Schematische Darstellung des Prägeprozesses

Der Fertigungsaufwand für die einzelnen DOEs kann so für größere Stückzahlen erheblich reduziert werden.

2 Strukturanforderungen

Wieviel Licht von den DOEs tatsächlich an die gewünschten Stellen gebeugt wird, hängt grundsätzlich von der Anzahl der Stufen ab, die zur Annäherung an das Idealprofil verwendet werden. So können bei Näherung eines Blazegitters mit 4 Stufen anstelle von 100% nur 81,06% in die 1.Ordnung gebeugt werden. Mit 8 Stufen können bereits 94,96% erreicht werden. [1]

Durch prozessbedingte Fehler wird die tatsächlich erreichte Beugungseffizienz reduziert. Welche Toleranzgrenzen zulässig sind, kann über optische Simulationen bestimmt werden. Setzt man sich beispielsweise bei einer 4-stufigen Treppenstruktur mit 5µm Sollbreite eine Beugungseffizienz von mindestens 80% zum Ziel, muss die Idealtiefe der DOEs auf ± 10nm eingehalten werden. Für die Abweichungen in der Breite sind ± 83nm zulässig. Auch die Positionierung der Lithographiemaske aus dem zweiten Prozessdurchlauf zu den Strukturen aus dem ersten Durchlauf muss exakt sein. Die Simulation ergibt eine Toleranz von ± 42nm.

3 Ion Beam Etching

Eine der größten Herausforderungen bei der lithographischen Strukturierung der DOEs und DOE-Prägewerkzeuge ist der Ätzprozess. Es ist wichtig, dass die Oberfläche auch in den strukturierten Bereichen eine ausreichende Oberflächenqualität aufweist. Versuche mit den zur Verfügung stehenden Verfahren Ion Beam Etching (IBE) und Reactive Ion Etching (RIE) haben gezeigt, dass sich mit einem IBE Prozess glattere Oberflächen erzielen lassen. Die Rauheitswerte beim IBE liegen bei etwa 5nm, während mit RIE eine Rauheit von 20nm entsteht (Abb 2).

Ein weiterer Vorteil des IBE - Verfahrens ist, dass die Strukturierung senkrechte Profilkanten erzeugt.

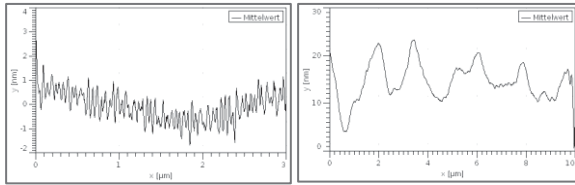


Abb. 2 AFM-Bild eines $3\mu\text{m}$ großen Scanfelds bei einer IBE (links) und einer RIE (rechts) strukturierten Probe. Die Oberflächenrauheit bei IBE beträgt $\approx 5\text{nm}$, bei RIE $\approx 20\text{nm}$.

Während der ersten Versuche wurde deutlich, dass die Materialwahl für die Stempelwerkzeuge entscheidend ist. Das liegt nicht nur an dem Abformungsprozess selbst. Die verwendeten Materialien müssen so beschaffen sein, dass sich die optische Oberfläche durch den IBE-Prozess nicht verschlechtert. Beim Strukturieren bisheriger Stempelsubstraten entstanden durch den IBE-Prozess Oberflächendefekte (Abb. 3).

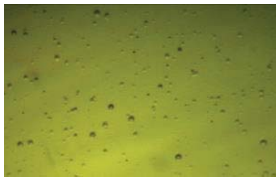


Abb. 3 Defekte im Stempelmaterial nach dem Ion Beam Etching mit bis zu $1\mu\text{m}$ Größe

Da die Ätztiefe auf einige Nanometer genau eingehalten werden muss, ist ein homogener Abtrag während des Ätzprozesses notwendig. Um das zu gewährleisten, wird eine Ionenstrahl-ätzanlage genutzt, deren Kaufmann-Ionenquelle sich durch ein homogenes Strahlprofil auszeichnet. Auf einem Durchmesser von 10cm fällt die Strahlintensität vom Zentrum zum Rand nur um 5% ab. Eine Kühlung des Substrathalters schützt die Maskierschicht aus Fotoresist vor hohen thermischen Belastungen. Außerdem besitzt die Anlage eine in situ Ätztiefenmessung. So kann der Abtrag schon während des Ätzprozesses bestimmt werden.

4 Messverfahren

Die Vermessung der Ätztiefe kann mit Hilfe von AFM und Höhenprofilmeter auf 3 bis 4nm genau erfolgen.

Die Breite und das Profil der Strukturen können mit den derzeit zur Verfügung stehenden Messgeräten (Lichtmikroskop, REM) lediglich auf 300nm genau vermessen werden. Hinsichtlich der zulässigen Toleranzen ist das für die Optimierung des Fotolithographieprozesses nicht ausreichend und bedarf weiterer Untersuchungen.

Die tatsächlich erzielten Strukturbreiten werden deswegen über eine optische Messung rekonstruiert. Es wurde ein Messplatz zur Bestimmung der Beugungseffizienz aufgebaut, an dem mit Hilfe einer Strahlprofilkamera gemessen

werden kann, wie hoch der Anteil des einfallenden Lichts in den einzelnen Beugungsordnungen ist. Über das oben genannte Simulationsmodell kann dann berechnet werden, welche Stufenbreite bei gemessener Lichtverteilung vorliegen muss.

5 Prägen der Glassubstrate

Erste Präge-Versuche haben gezeigt, dass bei der Abformung des Stempelwerkzeugs in Glas auch Strukturdetails sehr gut repliziert werden. Auf den geprägten Proben sind nicht nur laterale Strukturen sichtbar, auch Defekte im Stempel-Material werden auf die Gläser übertragen (Abb. 4). Trotz der im Stempel vorliegenden Defekte (Abb. 3) konnte mit den Elementen eine Beugungseffizienz von 67% für 4-stufige Blaze-Gitter erreicht werden.

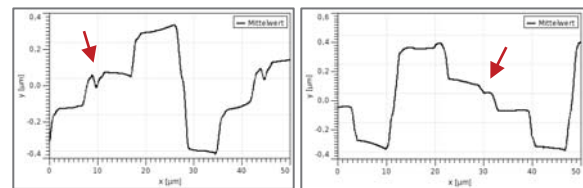


Abb. 4 Stempel (links) und abgeprägtes DOE (rechts) im AFM-Profil. Übertragung von Strukturdetails und Verrundung von Kanten sind an der markierten Stelle deutlich zu erkennen.

Die Kanten der Strukturen verrunden beim Abprägen sichtbar. Die Oberflächenrauheit der verwendeten Glassubstrate ändert sich durch das Prägeverfahren nicht. Der Ra-Wert liegt konstant bei etwa 3nm .

6 Zusammenfassung

Bei der Strukturierung effizienter mehrstufiger Diffraktiv Optischer Elemente sind enge Toleranzgrenzen einzuhalten. Das macht sowohl besonderen Fertigungs- als auch Messaufwand erforderlich.

Erste Prägeversuche haben gezeigt, dass das neu entwickelte isotherme Heißprägeverfahren auch die Abformung von Strukturdetails in der Größenordnung von einigen hundert Nanometern erlaubt. Die Oberflächenqualität bleibt dabei erhalten. Das Verfahren kann somit wesentlich zur Kostensenkung bei der Herstellung von DOEs für die Lasermaterialbearbeitung beitragen.

Literatur

- [1] J.W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics", Roberts&Company Publishers, 2005, 3.Auflage