

UV-Laserablation von Quarzglas zur Herstellung diffraktiver optischer Elemente

Jürgen Ihlemann, Malte Schulz-Ruhtenberg, Thomas Fricke-Begemann

Laser-Laboratorium Göttingen e.V., Göttingen

<mailto:jihle@llg.gwdg.de>

UV-Laserablation ermöglicht die präzise Bearbeitung von Quarzglas. Bei der Laserwellenlänge 193 nm beeinflussen die Oberflächeneigenschaften, bei 157 nm die Volumeneigenschaften das Ablationsverhalten. Die Herstellung eines vierstufigen diffraktiven Phasenelements durch Ablation bei 157 nm wird demonstriert.

1 Einführung

Laserablation unter Verwendung von UV- oder VUV-Wellenlängen ermöglicht die Bearbeitung transparenter Materialien mit sub- μm -Präzision. Dies kann dazu genutzt werden, diffraktive Phasenelemente (DPE) in Form von Oberflächenreliefs in Quarzglas für UV-Anwendungen herzustellen. Beispielsweise kann die Strahlführung für eine UV-Laserbearbeitung durch Einsatz von DPE deutlich vereinfacht werden (Abb. 1).

In dieser Arbeit wird das Ablationsverhalten von Quarzglas bei den Wellenlängen 193 nm und 157 nm untersucht. Als Beispielanwendung wird ein DPE als vierstufiges Relief auf einem 128 x 128 Pixel-Array hergestellt.

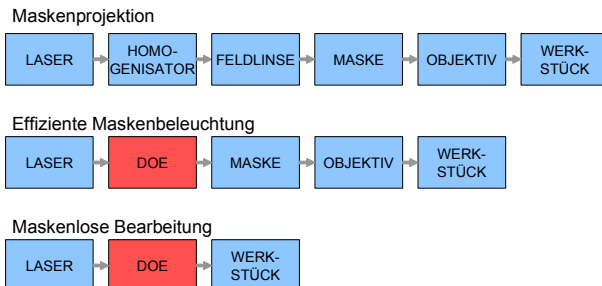


Abb. 1 Vereinfachung der Strahlführung für Laser-Materialbearbeitung durch Einsatz diffraktiver Elemente.

2 UV-Ablation von Quarzglas

Aufgrund seiner hohen Transparenz bis weit in den UV-Bereich hinein weist Quarzglas besondere Ablationseigenschaften auf. Bei der Laserwellenlänge 193 nm ist die Schwellfluenz F_S (Einsetzen des Materialabtrags) mit ca. 3 J/cm^2 im Vergleich zu stärker absorbierenden Materialien sehr hoch, die Abtragsrate h (Abtragstiefe pro Laserpuls) steigt darüber jedoch schnell auf Werte von einigen 100 nm/Puls an [1]. Bei 157 nm nimmt die Abtragsrate über der Schwellfluenz von $< 1 \text{ J/cm}^2$ dagegen stetig zu [2]. Bei 193 nm tritt nach einigen Pulsen oft ein unkontrolliertes Zersplittern auf; dies ist bei 157 nm nicht der Fall (Abb. 2).

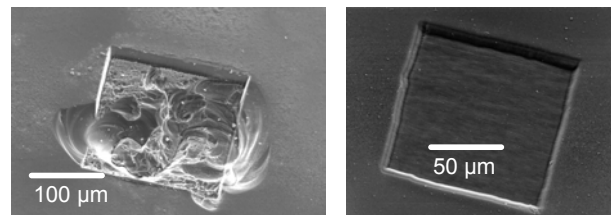


Abb. 2 Ablationslöcher in Quarzglas, links 193 nm, 9 J/cm^2 , 20 Pulse; rechts: 157 nm, $1,1 \text{ J/cm}^2$, 100 Pulse.

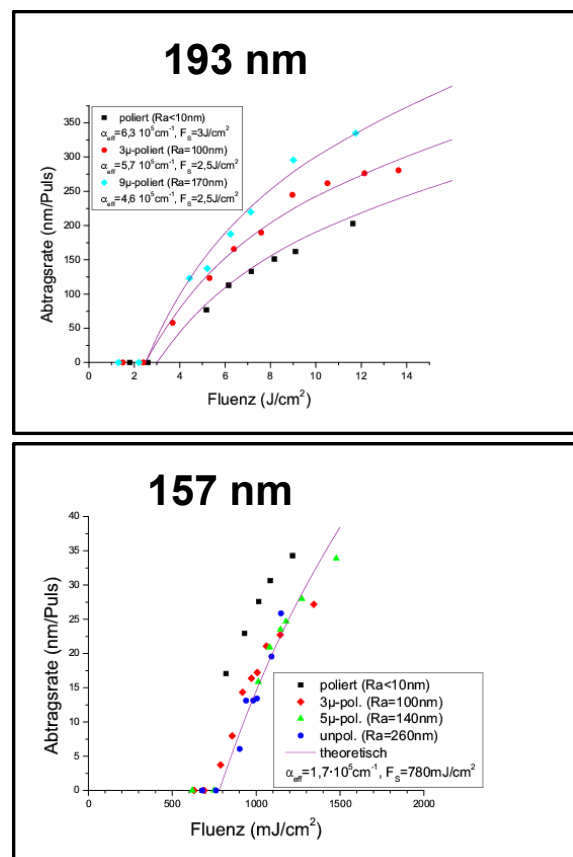


Abb. 3 Abtragsraten bei verschiedenen Oberflächenrauheiten, Fitkurven gemäß $h = \alpha_{\text{eff}}^{-1} \ln(F/F_S)$.

Abb. 3 zeigt die Abtragsraten in Abhängigkeit der Fluenz für verschiedene Oberflächenrauheiten. Während sich bei einer Ablationswellenlänge von

193 nm deutliche Unterschiede zeigen (raues Material zeigt eine höhere Abtragsrate), gibt es bei 157 nm kaum Unterschiede. Im Gegensatz dazu stehen die Ergebnisse für Materialien mit verschiedenen Volumeneigenschaften (OH-Gehalt). Bei 193 nm verhalten sich alle Quarzgläser gleich, bei 157 nm gibt es Unterschiede (Abb. 4). So weist das am stärksten UV-absorbierende Herasil die geringste Abtragsrate auf.

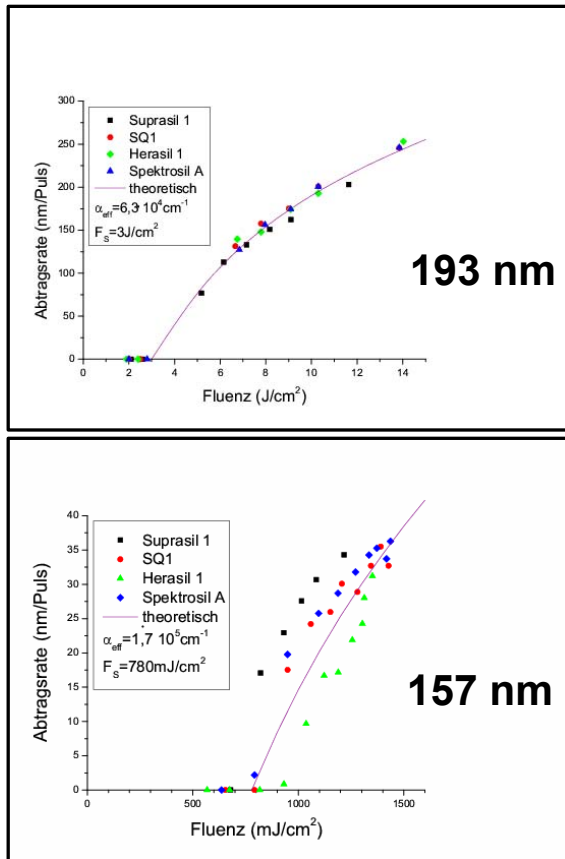


Abb. 4 Abtragsraten bei verschiedenen Volumeneigenschaften, Fitkurven gemäß $h = \alpha_{\text{eff}}^{-1} \ln(F/F_s)$.

3 Herstellung diffraktiver Phasenelemente

Die vierstufige Phasenfunktion für eine Sollintensitätsverteilung wird mittels eines Iterativen Fourier-Transformations-Algorithmus (IFTA) berechnet, so dass sie in einer 128 x 128 Pixel-Bitmap vorliegt [3]. In einer F₂-Laser-Bearbeitungsstation [4] wird eine quadratische Blende (200 x 200 μm²) 25fach verkleinert auf die Quarzglasoberfläche abgebildet, so dass bei hinreichender Fluenz auf 8x8 μm² großen Pixeln Abtrag induziert wird. Durch Steuerung der Fluenz und der Pulszahl für jede über eine Präzisionspositioniereinheit angefahrte Pixelposition wird die Ablationstiefe eingestellt [5].

Soll das DPE bei einer Wellenlänge λ effizient betrieben werden, so muss die Stufenhöhe d zwischen jeweils benachbarten Levels eines q-stufigen Elements $d = 1/q \times \lambda/(n-1)$ für ein Material mit Brechungsindex n in Luft betragen. Bei einem

vierstufigen Quarzelement ($q = 4$), das bei $\lambda = 193 \text{ nm}$ betrieben werden soll ($n = 1,56$), werden also Abstufungen von $d = 86 \text{ nm}$ benötigt. Abb. 5 zeigt ein derartiges Element. Die Sollhöhen werden auf < 20% genau eingehalten, die Oberflächenrauheit in den Pixeln beträgt 10-20 nm RMS.

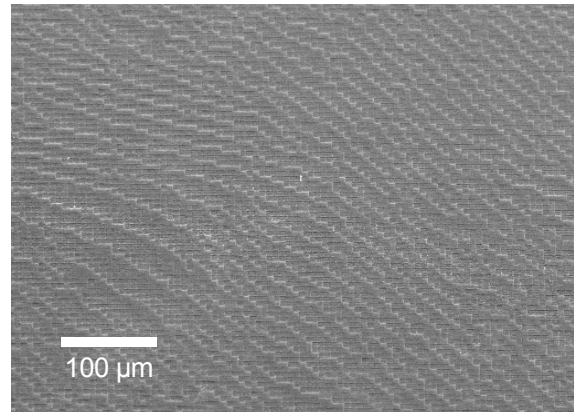


Abb. 5 Vierstufiges diffraktives Phasenelement, hergestellt durch F₂-Laserablation.

4 Zusammenfassung

Das Abtragsverhalten bei der Laserwellenlänge 193 nm wird durch die Oberflächeneigenschaften (Rauheit) bestimmt, bei 157 nm sind eher die Volumeneigenschaften des Quarzglas entscheidend. Mit der 157 nm-Strahlung eines F₂-Lasers in Kombination mit einer Schwarzschild-Optik zur Maskenprojektion können Oberflächenreliefstrukturen mit sub-μm-Auflösung erzeugt werden. Als Beispiel wird ein vierstufiges diffraktives Phasenelement gezeigt. Abstufungen von jeweils < 100 nm mit Rauheiten von < 20 nm auf den 8 μm x 8 μm Pixelflächen werden erreicht. Derartige Elemente werden zur Strahlformung eines 193 nm-Excimerlasers eingesetzt.

Danksagung

Gedankt wird der Arbeitsgruppe P.R. Herman (Uni. Toronto) für gute Kooperation und dem BMBF für finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] J. Ihlemann, B. Wolff-Rottke, P. Simon: Appl. Phys. A **54**, 363 (1992).
- [2] P.R. Herman, R.S. Marjoribanks, A. Oettl, K. Chen, I. Kononov, S. Ness: Appl. Surf. Sci. **154-155**, 577 (2000).
- [3] D. Schäfer, J. Ihlemann, K. Mann, G. Marowsky: Appl. Phys. A **69**, S319 (1999).
- [4] J. Li, P.R. Herman, M. Wei, K.P. Chen, J. Ihlemann, G. Marowsky, P. Oesterlin, B. Burghardt: Proc. SPIE Vol. **4637A**, 228 (2002).
- [5] M. Schulz-Ruhtenberg, J. Ihlemann, G. Marowsky, A.H. Nejadmalayeri, M.L. Ng, J. Li, P.R. Herman, Proc. SPIE Vol. **5063**, 113 (2003).