

Mikrostrukturierung mit ns- und fs-Pulsen

Bernd Keiper, Robby Ebert, Florian Wange, Uwe Helbig, Horst Exner

Laserinstitut Mittelsachsen e.V.(LIM),
 Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences Mittweida, Germany

Für Anwendungen in der Mikrosystemtechnik und Biotechnologie werden zunehmend Strukturen mit Abmessungen im Mikrometer- bzw. Submikrometerbereich in verschiedensten Materialien, insbesondere solchen, die mittels der aus der Mikroelektronik bekannten Verfahren nicht gut bearbeitet werden können, benötigt. Anodisch bondbares Pyrexglas ist in diesem Zusammenhang eines der besonders interessanten Materialien, weil es die Verwendung von Glas in Verbindung mit Silizium erlaubt.

Der hier vorgestellte Beitrag präsentiert die am LIM erzielten Ergebnisse zur Erzeugung von Mikrobohrungen und Mikrokanälen in Borsilikatglas mittels ArF-Excimerlaser und fs-Laser. Durch Einsatz des fs-Lasers können sehr kleine Bohrungsdurchmesser von 34 µm am Eintritt und 2 µm am Austritt in einer gegenüber dem ArF-Laser kürzeren Bearbeitungszeit realisiert werden.

For applications in microsystems technology and biotechnology there is a growing demand for structures in the micrometer respectively sub micrometer range in different materials, particularly in such materials that can not be processed in a sufficiently quality by conventional microelectronic technologies. In this regard anodic bondable PYREX glass is one of the especially interesting materials due to its usability together with silicon.

This article represents the at LIM achieved results of the generation of micro holes and channels in borosilicate glass using an ArF-excimer laser and an fs-laser. By application of the fs-laser very small hole diameters of 34 µm at the entrance and 2 µm at the exit can be made in the shorter processing time compared to the ArF-Laser.

Experimentelle Grundlagen

Für die Untersuchungen zur Borsilikatglasbearbeitung wurden folgende Laseranlagen eingesetzt: Mikrobearbeitungsstation FS-150-10 der Firma 3D-Micromac AG aus Chemnitz, die mit dem Laser CPA 2010 der Firma Clark-MXR Inc. (Michigan, USA) ausgerüstet ist, und eine Mikrobearbeitungsstation bestehend aus dem ArF-Excimerlaser ExciStar S-500 der Firma TUILASER AG und dem LightBench System der Firma ATL Lasertechnik GmbH. Die Parameter der Anlagen sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Parameter der verwendeten Laseranlagen

Laserparameter	CPA 2010 (Ti: Saphir)	ExciStar S500 (ArF)
Wellenlänge [nm]	775	193
Pulsdauer	150 fs	10 ns
Pulsenergie [mJ]	bis 1	bis 8
Frequenz: [kHz]	1	bis 0,5
Anlagenparameter	FS-150-10	
Verfahrenbereich	200mm×200mm	150mm×150mm
Verfahrgeschwindigkeit	bis 12 m/min	bis 12 m/min
Positioniergenauigkeit	±1,0µm	±3,0µm
Auflösung	0,1µm	0,1µm
Brennweite	50 mm	
Abbildungsmaßstab		1:10

Eine Prinzipskizze der ArF-Laserbearbeitungsstation ist in [1] enthalten. Die Erzeugung von Mikrobohrungen in 500 µm dicken Pyrexglaswafers wurde mit beiden Anlagen untersucht. Die Erzeugung von Kanälen wurde dagegen bislang nur mit der Excimerlaserbearbeitungsstation vorgenommen.

Bei der Wellenlänge 775 nm sind Borsilikatgläser vollständig transparent. Die Absorption der Laserstrahlung muss deshalb bei den extrem hohen

Photonendichten im Fokus des fs-Lasers ausschließlich über Mehrphotonenabsorption erfolgen.

Erzeugung von Mikrobohrungen in Pyrexglas

Mittels Maskenprojektionsabtrag bei der Wellenlänge 193 nm wurden konische Löcher in Pyrexglas mit Durchmessern im Bereich von 30 bis 150 μm am Laserstrahleintritt und entsprechend 4 bis 50 μm am Austritt erzeugt, wobei am Austritt Ausbrüche im Glas zu beobachten waren. Die Ausbrüche konnten durch beidseitiges Bohren beseitigt werden (siehe Abb.1a). Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse zum Bohren von Pyrexglas mittels Excimerlasermaskenprojektion haben wir bereits in [1] vorgestellt.

Für die Untersuchungen mit dem fs-Laser wurde ein 50 mm Transmissionsobjektiv eingesetzt, wobei die Laserpulsenergie auf der Probe zwischen 30 und 870 μJ variiert wurde.

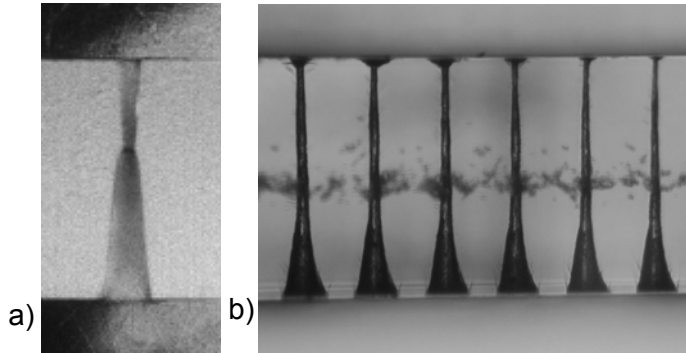


Abb.1: Querschnitte von Bohrungen in Pyrexglas: a) beidseitige Bohrung mittels Excimerlaser (100 μm von unten, 50 μm von oben), b) Beispiel für eine Bohrungsreihe mittels fs-Laser (Zunahme der Energie von rechts nach links \Rightarrow Zunahme von Durchmesser und Ausbrüchen).

Mit zunehmender Laserpulsenergie ist eine Zunahme des Durchmessers der Bohrung am Laserstrahleintritt von 15 auf 70 μm sowie eine Zunahme der maximal erreichbaren Bohrlochtiefe zu beobachten (in Abb.2 für 700 Laserpulse dargestellt). Ebenso wie beim einseitigen Bohren mittels ArF-Excimerlaser kam es am Laserstrahlaustritt zu Ausbrüchen. Ursachen sind die Sprödigkeit des Materials und thermisch induzierte mechanische Spannungen in Verbindung mit der Kraft, die durch den Druck des Laserplasmas auf den Boden der Bohrung ausgeübt wird. Dadurch wird kurz vor Erreichen der Durchgangsbohrung das verbliebene Material nach hinten ausgebrochen.

Solche Ausbrüche sind in Abb.1b zu erkennen, in der einige Bohrungen im Querschnitt beispielhaft dargestellt sind. Die Größe der Ausbrüche nimmt mit zunehmender Laserfluenz zu. Neben der Verwendung der kleinsten möglichen Laserfluenz können solche Ausbrüche üblicherweise durch geeignete Prozessführung, beispielsweise den Einsatz eines „Backer“-materials unterhalb der Probe, unterdrückt werden. Eine vollständige Vermeidung von Ausbrüchen konnte jedoch bislang nicht erreicht werden.

Bei Verwendung von 700 Laserpulsen wird ein Durchgangsloch im 500 μm dicken Pyrexglas oberhalb von 400 μJ Laserpulsenergie erreicht, wobei der Durchmesser am La-

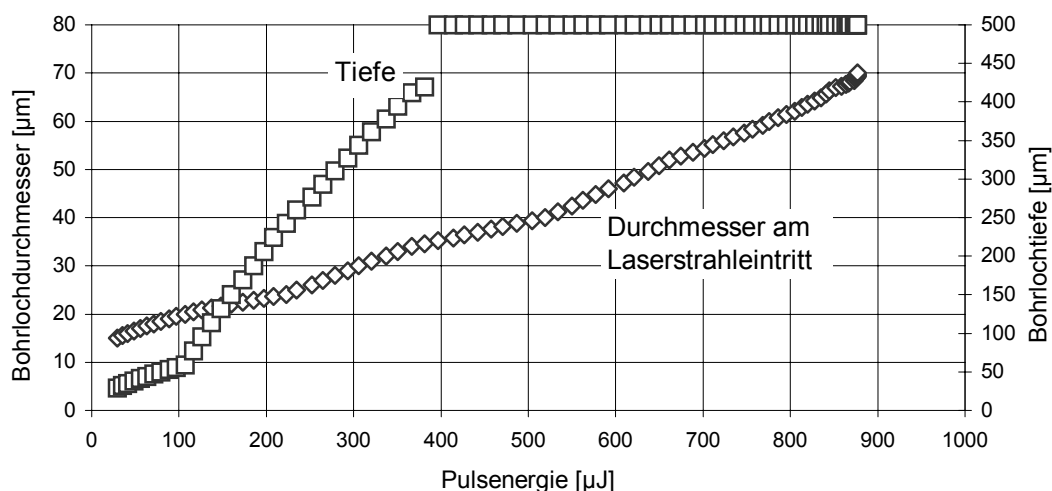


Abb.2: Abhängigkeit des Bohrlochdurchmessers am Laserstrahleintritt sowie der Bohrlochtiefe von der Laserpulsenergie bei Verwendung des 50 mm Transmissionsobjektivs und 700 Laserpulsen.

serstrahleintritt 34 und am Laserstrahlaustritt 2 μm beträgt (siehe auch Abb. 3a bis c).

Unter Verwendung von 645 μJ Laserpulsenergie wird eine Durchgangsbohrung bereits nach 500 Laserpulsen erreicht, es werden jedoch bedeutend stärkere Ausbrüche am Laserstrahlaustritt beobachtet.

Im Vergleich zum Bohren mittels ArF-Excimerlaser können mittels fs-Laser 500 μm dicke Wafer in deutlich kürzerer Zeit gebohrt werden (0,7 s im Vergleich zu 5 s). Ein weiterer Vorteil ist die nach einem anfänglich stark konischen Bereich im Bohrlochquerschnitt, eine im weiteren Verlauf geringere Konizität der mittels fs-Laser erzeugten Löcher (siehe Abb.3a).

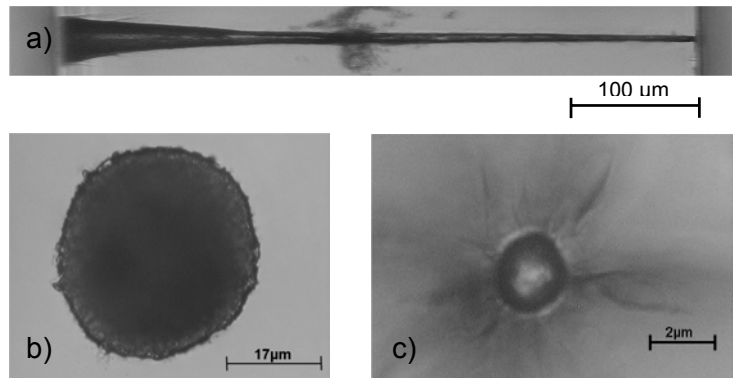


Abb.3: Mittels fs-Laser erzeugte Bohrung in Pyrexglas (400 μJ Pulsenergie, 700 Pulse, 50 mm Objektiv), a) Querschnitt, b) Laserstrahleintritt (34 μm \varnothing), c) Laserstrahlaustritt (2 μm \varnothing)

Erzeugung von Mikrokanälen in Borsilikatglas

Mikrokanäle in Borsilikatglas wurden mittels Excimerlasermaskenprojektion durch Einsatz einer quadratischen Maske und gleichmäßiger Vorschubbewegung der Probe während der Bearbeitung erzeugt. Maskengröße und Pulsabstand bestimmen die Zahl der Laserpulse, die auf das bearbeitete Gebiet während eines Bearbeitungszyklus treffen und somit die Kanaltiefe. Durch Wiederholung des Bearbeitungszyklus werden größere Kanaltiefen erreicht. In Tabelle 2 ist die Abhängigkeit des Bearbeitungsergebnisses von verschiedenen Parametern nach jeweils einfacher Bearbeitung dargestellt.

Tabelle 2: Kanäle in Borofloatglas im Auflichtmikroskop: Rauigkeit Ra[nm] und Tiefe[μm] in Abhängigkeit von Prozessgas und Pulsabstand. (Abbildung: \square 100 μm , Laserfluenz: 3 J/cm^2).

Pulsabstand	0,5 μm	1 μm	2 μm	4 μm	8 μm
Prozessgas Ar					
Ra[nm] / Tiefe [μm]	356/8,5	203/4,5	91/1,25	58/0,81	79/0,53
Prozessgas He					
Ra[nm] / Tiefe [μm]	408/9	447/6	-/-	133/0,3	43/0,2

Bei Verwendung von He als Prozessgas ist die größte Neigung zum Abplatzen von Glassplittern im bestrahlten Gebiet zu beobachten. Mit Stickstoff, Luft und Druckluft ist das Bearbeitungsergebnis geringfügig besser und mit Ar werden die besten Ergebnisse erzielt, was auf die unterschiedliche Kühlwirkung der Gase zurückzuführen sein sollte. Betrachtet

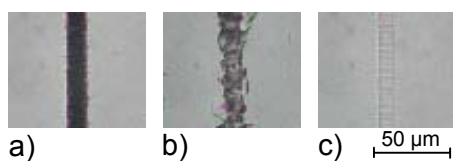


Abb.4: Kanäle in Borofloatglas, Abbildung: \square 10 μm , Prozessgas: Ar, Laserfluenz: 5 J/cm^2 , Pulsabstand: a) 0,05 μm , b) 0,45 μm , c) 1,9 μm ; Tiefe: c) 0,65 μm , Ra: c) 33 nm.

man den Einfluss des Pulsabstandes auf das Bearbeitungsergebnis (Prozessgas: Ar), so ist bei großen Pulsabständen (2...8 μm) ein sehr glatter Boden der Kanäle zu erkennen. Dieser weist lediglich eine geringe Welligkeit aufgrund der aneinander gesetzten Pulse auf. Geringe Pulsabstände (ca. 0,5 μm) führen zu einer typischen Mikrorauigkeit am Boden der Kanäle. Dieser Effekt kann dafür genutzt werden, um Oberflächeneigenschaften an unterschiedliche Anforderungen (z.B.: Adsorptionseigenschaf-

ten, Reibungskoeffizient und Benetzungseigenschaften) anzupassen.

Bei einer kleineren Abbildungsgröße und damit Kanalbreite von 10 µm (Abb.4) entstehen in einem großen Parameterbereich starke Ausplatzungen in der Umgebung des bearbeiteten Bereichs der Probe. Nur bei sehr geringem Pulsüberlapp von ca. 80 % bzw. 1,9 µm Pulsabstand (Abb.4c) entstehen glatte Kanäle mit geringer Rauigkeit aber auch geringer Tiefe. Wählt man einen sehr kleinen Pulsabstand von 0,05 µm und weniger (Abb.4a), treten keine großflächigen Abplatzungen in der Umgebung der Kanäle auf, am Rand des Kanals existieren jedoch gleichmäßige kleine Bruchflächen mit Abmessungen von ca. 1 µm.

Ähnliche Ergebnisse wie mit Borofloatglas wurden bei der Bearbeitung von Pyrexglas erzielt, wobei jedoch weniger Ausbrüche auftraten und sich geringere Rauigkeiten für den Boden der Kanäle ergaben (siehe Abb.5 und [2]).

Generell ist die gepulste lokale Erwärmung in Verbindung mit hohen Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeiten und damit hohen Temperaturgradienten eine Ursache für thermisch induzierte mechanische Spannungen und damit für die parameterabhängig festgestellten Ausbrüche. Um Ursachen für das unterschiedliche Verhalten der ähnlichen Materialien zu ermitteln, wurden die Transmissionswerte für die verwendete Laserwellenlänge an Pyrexglas der Dicke 200 µm und an Borofloatglas der Dicke 500 µm gemessen

Tabelle 3: Absorptionseigenschaften von Borsilikatgläsern bei der Wellenlänge 193 nm

	Absorptionskoeffizient α	Eindringtiefe
Pyrexglas	258 cm ⁻¹	39 µm
Borofloatglas	64...105 cm ⁻¹	95...157 µm

und daraus die Absorptionskoeffizienten α sowie die Eindringtiefe (Abfall der Intensität auf den 1/e-fachen Wert) berechnet (siehe Tabelle 3). Bei den ermittelten Absorptionskoeffizienten ist ein Abtrag der genannten Gläser bereits mit relativ geringen Laserfluenzen möglich. Die dennoch relativ großen Eindringtiefen der Strahlung sind offenbar eine Ursache für die Ausbildung von Rissen und Ausbrüchen. Die bessere Bearbeitbarkeit von Pyrexglas lässt sich durch seinen höheren Absorptionskoeffizienten bei Raumtemperatur erklären. Da der Absorptionskoeffizient der Gläser mit steigender Temperatur zunimmt, treten weniger Risse auf, wenn im bestrahlten Gebiet während der Bearbeitung im Mittel über mehrere Pulse höhere Temperaturen vorhanden sind. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn mit hohen Frequenzen gebohrt wird, wobei folgerichtig auch keine Unterschiede im Bearbeitungsergebnis zwischen den Gläsern beobachtet werden.

Danksagung

Die Untersuchungen wurden teilweise mit Mitteln des BMBF (Innoregio InnoSachs, FKZ 03i1702) gefördert.

Die Autoren danken weiterhin der 3D Micromac AG, Chemnitz für die freundliche Unterstützung und Iris Höbelt vom Zentrum für Mikrotechnologien (ZfM) an der TU Chemnitz für die Anfertigung der REM Aufnahmen sowie Andreas Eysert von der Hochschule Mittweida für die Anfertigung der Querpräparation.

Literaturnachweis:

- [1] B. Keiper, H. Exner, U. Löschner, T. Kunze: J. Laser Applications Vol. 12, No. 5, S189-193 (2000).
- [2] B. Keiper, R. Ebert, R. Böhme, H. Exner, Proceedings of SPIE, Volume 5116, S. 20-27 (2003).

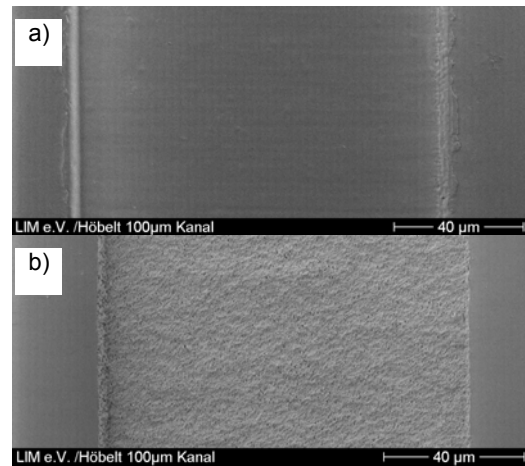


Abb.5: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Kanälen in Pyrexglas: □ 100 µm Abbildungsgröße a) Laserfluenz: 4.8 J/cm², Pulsabstand: 3 µm, Ra=50 nm; b) Laserfluenz: 5.5 J/cm², Pulsabstand: 1.5 µm, Ra=150 nm;