

Erzeugen und Verfüllen von Mikroöffnungen in Pyrexglas

Bernd Keiper, Robby Ebert, Carsten Merzdorf, Günter Reißer, Horst Exner
Laserinstitut Mittelsachsen e.V.(LIM), Hochschule Mittweida, University of Applied
Sciences
Mittweida, Germany

1. Einleitung

Mit der in vielen Bereichen der Technik zu beobachtenden zunehmenden Miniaturisierung von Baugruppen gewinnt die Mikrosystemtechnik gegenwärtig zunehmend an Bedeutung. Dabei liegen die Dimensionen der Elemente im allgemeinen im Bereich von einigen Millimetern, die Einzelstrukturen können jedoch Abmessungen von nur wenigen Mikrometern bis zu einigen hundert Nanometern aufweisen. Als Material für die diversen Komponenten der Mikrosysteme wie Sensoren und Aktoren sind z.B. biokompatible Werkstoffe wie Keramiken, Gläser, Diamant oder Kunststoffe zu verwenden. Um jedoch ähnlich kleine Strukturen zu erzeugen, wie sie heute aus der Halbleitertechnik durch Anwendung der Siliciumtechnologie bekannt sind, werden neue Verfahren für die Nicht-Siliciumtechnologie benötigt. Hierfür ist die Lasertechnologie besonders geeignet, da nahezu alle Materialien mit Auflösungen bis wenigstens in den Mikrometerbereich strukturiert werden können. Anodisch bondbares Pyrexglas ist dabei von besonderem Interesse, weil es die Verwendung von Glas in Verbindung mit der etablierten Siliciumtechnologie erlaubt.

Am Laserinstitut Mittelsachsen e.V. (LIM) wurde das Erzeugen von Mikrobohrungen in Pyrexglas durch Anwendung des Excimerlasermaskenprojektionsverfahrens untersucht. Verglichen mit der bereits industriell verbreiteten Lasermikrobearbeitung von Kunststoffen ist die Bearbeitung von Gläsern anspruchsvoller, da weitaus höhere Laserfluenzen benötigt werden und eine rissfreie Bearbeitung durch die Sprödigkeit des Materials erschwert wird.

In einem nachfolgenden Bearbeitungsschritt sollen die erzeugten Mikroöffnungen durch den Einsatz des Laser- CVD Verfahrens mit leitfähigem Material hermetisch dicht verfüllt werden.

2. Experimentelle Grundlagen zum Mikrobohren

Zum Bohren von Pyrexglaswafern mit einer Dicke von 500 µm wurde eine Excimerlaserbearbeitungsstation (siehe Abb.2.1) aufgebaut. Der verwendete kostengünstige ArF-Excimerlaser vom Typ Existar S-500 sollte dabei bezüglich seiner Anwendbarkeit für die Mikrobearbeitung untersucht werden.

Die Spülung des gesamten Strahlenganges vom Laser bis zum Bearbeitungsort mit Ar ist erforderlich, weil die Absorption von Photonen der verwendeten Laserwellenlänge von 193 nm durch Luftsauerstoffmoleküle zur Verringerung der Laserenergie auf der Probenoberfläche um ca.20 Prozent sowie zur Bildung von Ozon führen würde.

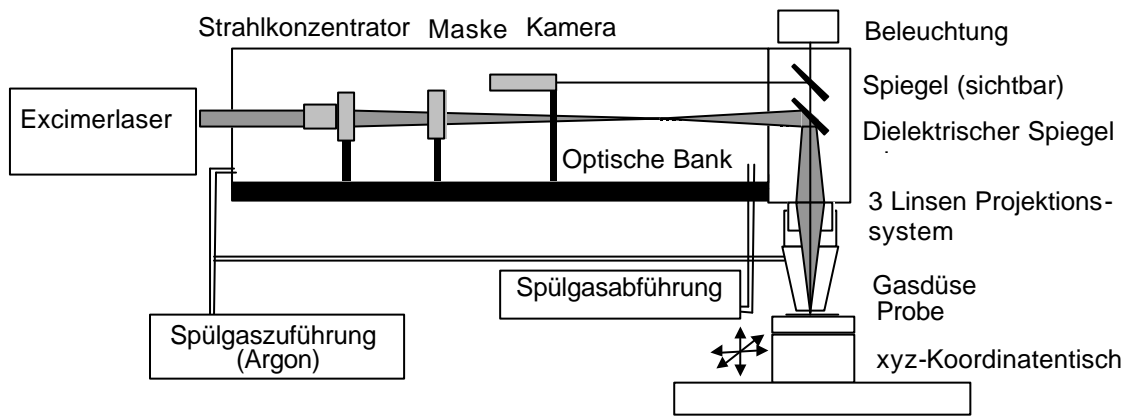


Abb.2.1: Experimenteller Aufbau zur Bohren von Pyrexglas

Zur Erzeugung der Mikrobohrungen wurde eine kreisförmige Maske mit einem Verkleinerungsmaßstab von 1:10 auf die Probenoberfläche abgebildet, wobei der Durchmesser in der Abbildungsebene im Bereich zwischen 30 und 200 μm gewählt wurde. Die Abbildungsebene lag somit auf der Probenoberfläche und wurde während der Bearbeitung nicht nachgeführt.

Tabelle 2.1: Bearbeitungsparameter

ArF-Excimerlaser ExciStar S-500 der Firma TUI-Laser					
Wellenlänge	Pulsdauer	Pulswiederhol- frequenz	Puls- energie	Laserfluenz	Verkleinerungs- maßstab
[nm]	[ns]	[Hz]	[mJ]	[J/cm ²]	
193	10	50 bis 500	bis 8	4 bis 25	1:10

Ein speziell angepasstes Kamerasystem ermöglicht die Einstellung der Abbildungsebene und die Beobachtung des Bearbeitungsvorganges. Für die Bewegung der Probe wurde ein xyz-Koordinatentisch (150 mm x 100 mm x 11 mm) mit einer Auflösung von 0.5 μm eingesetzt. In Tabelle 2.1 sind die verwendeten Bearbeitungsparameter dargestellt.

3. Ergebnisse und Diskussion zum Mikrobohren

Zunächst wurde die Durchbohrzeit in Abhängigkeit von der Laserfluenz und der Laserpulswiederholfrequenz bestimmt und daraus die mittlere Abtragrate berechnet (siehe Abb.3.1).

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Abtragtiefe pro Laserpuls nahezu unabhängig von der verwendeten Laserpulswiederholfrequenz ist. Unterhalb einer bestimmten Laserfluenz stoppt der Bohrprozess in einer vom Eintrittsdurchmesser und vom sich aus

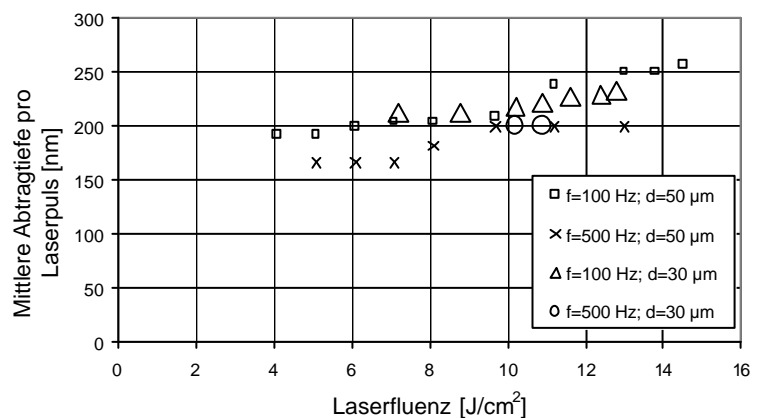


Abb.3.1: Abhängigkeit der mittleren Abtragtiefe pro Laserpuls von der Laserfluenz bei verschiedenen Laserpulswiederholfrequenzen f und Abbildungsebenendurchmessern d .

der verwendeten Laserfluenz einstellenden Wandwinkel abhängigen Tiefe, ohne dass ein Durchbohren des Wafers erfolgt.

Die Abtragtiefe pro Laserpuls nimmt mit steigender Laserfluenz geringfügig zu. Die minimale Fluenz, die die Erzeugung einer Durchgangsbohrung erlaubt, steigt mit abnehmendem Durchmesser in der Abbildungsebene. Dieses Verhalten sollte auf die höhere Wärmeableitung aus der kleineren bestrahlten Fläche zurückzuführen sein. Die mittlere Abtragtiefe pro Laserpuls ist dagegen bei gleicher Fluenz vom Durchmesser der Abbildungsebene unabhängig.

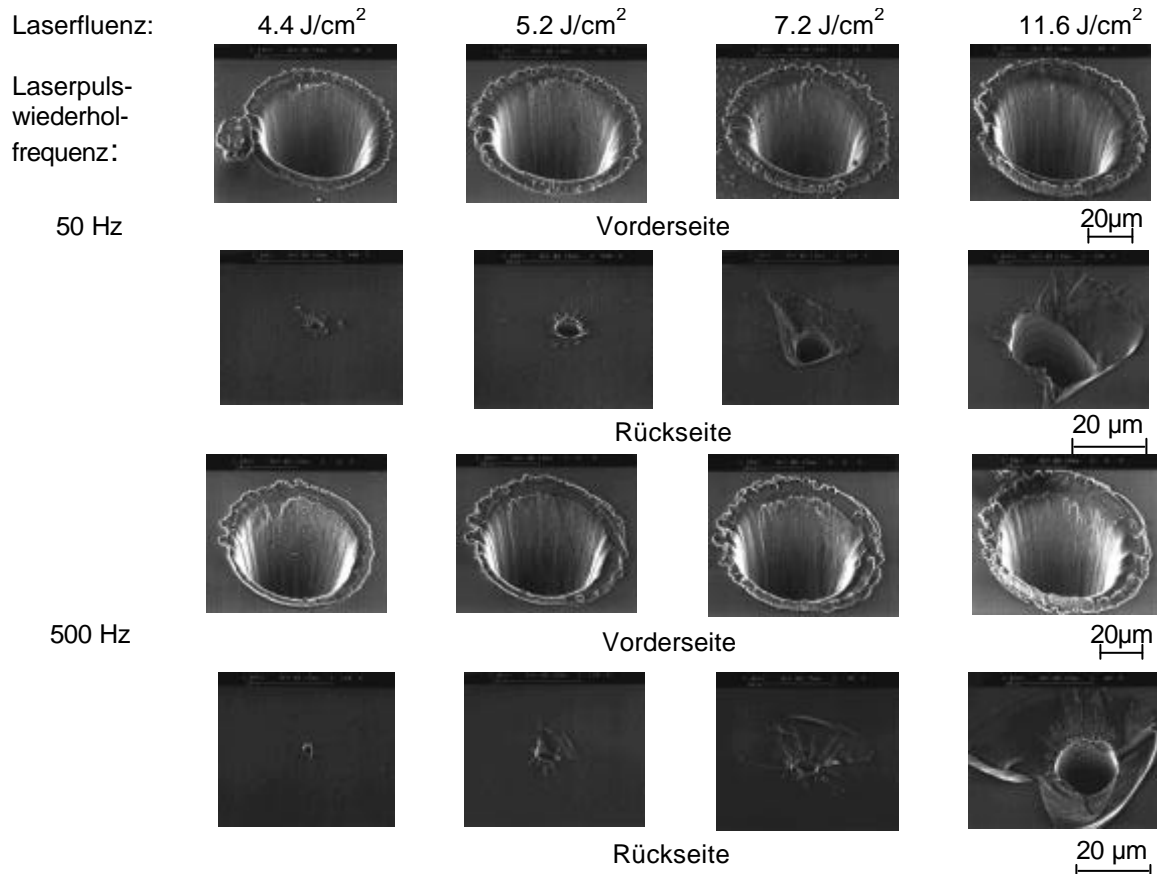


Abb.3.2: REM- Aufnahmen von Bohrungen in 500 µm dickem Pyrexglas, die mit 50 µm Durchmesser in der Abbildungsebene sowie unterschiedlichen Laserfluenzen und Laserpuls wiederhol frequenzen erzeugt wurden.

Anhand der in Abb.3.2 dargestellten rasterelektronenmikroskopischen (REM-) Aufnahmen kann die Qualität der Bohrungen beurteilt werden: Die Geometrie der Bohrungen ist generell konisch, wobei der Durchmesser am Laserstrahleintritt dem Abbildungsebenendurchmesser entspricht. Ein Einfluss der Laserpuls wiederhol frequenz auf die Qualität der Bohrungen konnte nicht festgestellt werden.

Mit zunehmender Laserfluenz nimmt der Aufwurf an der Vorderseite der Bohrungen geringfügig zu. An der Probenrückseite kommt es zur Bildung von Ausbrüchen bzw. Rissen, die minimal sind, wenn die kleinste Laserfluenz, die die Erzeugung einer Durchgangsbohrung erlaubt, eingesetzt wird. Der Bohrungsdurchmesser an der Probenrückseite ist in diesem Fall jedoch sehr gering (1...3µm) und die Konizität der Bohrung entsprechend groß. Die Winkelabweichung zur idealen zylindrischen Bohrung beträgt 2,7°.

Eine mögliche Ursache für die Entstehung der Ausbrüche an der Probenrückseite ist der hohe Druck des expandierenden Laserplasmas, der offenbar zur Überschreitung der Bruchspannung des Materials an der Unterseite der Bohrung führt.

Nach der Untersuchung einer Reihe von Maßnahmen zur Vermeidung solcher Ausbrüche [1] hat sich das beidseitige Bohren der Wafer als Lösungsmöglichkeit herausgestellt (siehe Abb.3.3).

Zunächst wurden entsprechend den positiven Ergebnissen der vorangegangenen Versuche Laserfluenzen knapp oberhalb der Durchbohrschwelle gewählt. Wie die REM-Aufnahme der Vorderseite einer solchen Bohrung (Abb.3.4a) zeigt, wird dabei jedoch der vordere Teil der Bohrungsinnenwand mit Partikeln, die von der Rückseite

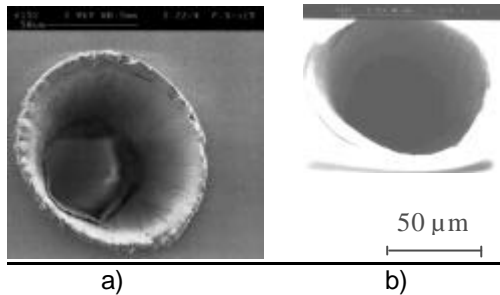


Abb.3.4: REM-Aufnahmen der Vorderseite von beidseitigen Bohrungen in 500 µm dickem Pyrexglas bei 100 µm Durchmesser in der Abbildungsebene a) 4,5 J/cm² Laserfluenz, b) 10 J/cm² Laserfluenz.

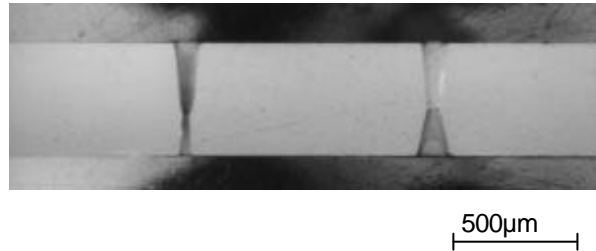


Abb.3.3: Querschliff doppelseitiger Bohrungen in Pyrexglas mit einem Durchmesser in der Abbildungsebene von 100 µm an der Vorderseite und 50 µm (links) bzw. 100 µm an der Rückseite.

abgetragen wurden, beschichtet. Diese Beschichtung hat sich teilweise von der Bohrungswand gelöst. Die dadurch entstandene Stufe wirkt sich störend auf mögliche Anwendungen aus, da beispielsweise eine nachfolgende geschlossene Metallbeschichtung der Bohrungsinnenwand stark behindert würde. Ein weiterer Nachteil der so erzeugten Bohrungen besteht im geringen Durchmesser in der Mitte der Bohrung.

Bei der Verwendung hoher Laserfluenzen wird dagegen das gesamte abgetragene Material aus der Bohrung ausgeworfen und es entstehen glatte relativ steile Wände ohne störende Ablagerungen (siehe Abb.3.4b). Die durch die hohen Laserfluenzen verursachten Ausbrüche bzw. Risse an der Rückseite werden bei der nachfolgenden Bohrung von dieser Seite vollständig abgetragen, so dass diese sich nicht negativ auf das Bearbeitungsergebnis auswirken.

4. Experimentelle und verfahrenstechnische Voraussetzungen zum Verfüllen der Mikrobohrungen

Das Verfüllen der Bohrungen soll durch den Einsatz des Laser- CVD Verfahrens erfolgen [2]. Hierzu wurde eine Anlage bestehend aus Laserquelle (wahlweise Nd:YAG- oder A⁺-Laser), Scanner, Koordinatentisch, Gasversorgung und Vakuumkammer (siehe Abb. 4.1) mit Vakuumanlage aufgebaut.

Als Precursor zur Abscheidung von Al-Schichten soll das bereits gut erprobte Trimethylaluminan zum Einsatz gelangen.



Abb.4.1: CVD- Vakuumkammer zur Bearbeitung von 4“ Wafern

Im Mikrobereich wird Laser CVD z.B. zur Reparatur von Masken und Schaltkreisen in Form des „direct writing“ Verfahren eingesetzt. Dabei wird ein fokussierter Laserstrahl über eine Subtratoberfläche geführt. In der durch den Laserfokus begrenzten Mikroreaktionszone kommt es durch die allseitig eindiffundierenden Reaktionsgase (dreidimensionale Diffusion) in Abhängigkeit vom Druck zu extrem hohen Abscheideraten von bis zu 100µm/s. Das Verfüllen der Bohrungen stellt jedoch eine andersartige Technologie dar. Vor allem in zwei Punkten sind Unterschiede zum „direct writing“ Verfahren zu erwarten:

1. Die Zuführung der Reaktionsgase zur Reaktionszone erfolgt durch die zu verfüllende Bohrung selbst. Damit liegt keine dreidimensionale Diffusion mehr vor. Die Abscheideraten werden deshalb gegenüber dem „direct writing“ Verfahren entsprechend sinken.
2. Das in der Bohrung induzierte Temperaturfeld breitet sich in der Probe vor allem lateral aus.

Durch die Prozessgestaltung muss deshalb gewährleistet werden, dass genügend Reaktionsgas zugeführt werden kann und dass es nicht zur übermäßigen Ausbreitung des Temperaturfeldes über den Bohrungsrand hinaus kommt, da dies zu einem undefinierten lateralen Schichtwachstum außerhalb der Bohrung führen könnte.

Aufgrund dieser Randbedingungen und den vorliegenden Erfahrungen mit der Laser CVD Technologie soll die Abscheidung mit gepulster Strahlung durchgeführt werden [3]. In der Pulspause können das Temperaturfeld abgebaut werden und die Reaktionsgase zur Reaktionszone nachströmen. Die Pulsung kann durch den Laser selbst (Laser gütegeschaltet oder freilaufend gepulst) oder durch die Prozessführung erfolgen.

Bei einer Realisierung durch die Prozessführung wird der Laserstrahl mit einem Scanner von Bohrung zu Bohrung geführt. Die Verweildauer pro Bohrung entspricht der Pulsdauer. Die Pulspause ergibt sich durch den zeitlichen Zwischenraum bis zum nächsten Scandurchgang. Die Form der Bohrung wird leicht konisch nach oben ausgeführt. Dadurch wird sichergestellt, dass die Bohrung von unten nach oben zuwachsen kann. Die übermäßige Ausbreitung des Temperaturfeldes am Bohrungsrand soll durch eine zusätzliche Substratkühlung in der Pulspause unterdrückt werden.

Mit dieser Vorgehensweise können die Bohrungen stufenweise zeitlich parallel verfüllt werden, was ein ökonomisches Verfahren ermöglicht.

Danksagung

Die Autoren danken der Dr. Teschauer & Petsch AG, Chemnitz für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Projektes „3D-Lasermikrostrukturierung“, welches aus EFRE-Mitteln der EU und aus Mitteln des Freistaates Sachsen (Projekt-Nr.: 4355/679) gefördert wird und dem BMBF für die Förderung des Projektes „Erzeugen und Verfüllen von Mikroöffnungen“ (FKZ: 1705399) .

Weiterhin danken wir Ina Schubert vom Zentrum für Mikrotechnologien, TU Chemnitz für die Durchführung der REM-Untersuchungen und Andreas Eysert von der Hochschule Mittweida für die Anfertigung der Querpräparation.

Literaturnachweis:

- [1] B. Keiper, H. Exner, U. Löschner, T. Kuntze: "Drilling of Glass by Excimer Laser Mask Projection Technique", presented at the 18th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, Nov. 15-18, 1999 in San Diego, California, will be published in ICALEO Proceedings.
- [2] G. Reisse, R. Ebert; „Titanium nitride thin film deposition by Laser CVD“, presented at 2nd Int. Conf. on Photo-Excited Processes and Applications, 17-21 September 1995, Jerusalem, Israel, Applied Surface Science, Vol. 106 (1996) 268-274.
- [3] Morishige-Y; Kishida-S., "Thick gold-film deposition by high-repetition visible pulsed-laser chemical vapor deposition", Applied Physics A (Solids and Surfaces), Band A59 (1994) Heft 4, Seite 395-399