

Kostengünstige Fertigung großflächiger Druckköpfe durch Lamination von Trockenlacken auf vorstrukturierte Polymersubstrate

Cost-efficient fabrication of large-scale printheads using lamination of dry film photoresists on pre-patterned polymer substrates

Kiril Kalkandjiev^{1*}, Ludwig Gutzweiler¹, Roland Zengerle¹, Peter Koltay^{1,2}

¹ Universität Freiburg, Institut für Mikrosystemtechnik - IMTEK, Lehrstuhl für Anwendungsentwicklung, Georges-Köhler-Allee 106, 79110 Freiburg

² BioFluidix GmbH, Georges-Köhler-Allee 106, 79110 Freiburg

* kiril.kalkandjiev@imtek.de

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird ein mikrofluidischer Kunststoff-Druckkopf als Alternative zu seinem etablierten Silizium/Glas-Äquivalent beschrieben. Der Druckkopf wurde durch die Kombination spanabhebender und lithographischer Verfahren hergestellt, welche für großflächige Bauteile mit mikrostrukturierten Durchgangsöffnungen besonders geeignet sind. Er beinhaltet 24 Düsen mit einem Durchmesser von 50 µm, die über mikrofluidische Kanäle mit jeweils einem Reservoir verbunden sind. Alle Mikrostrukturen wurden im Trockenlack TMMF strukturiert, das Druckkopffinterface besteht aus PMMA. Die verhältnismäßig große Grundfläche von 36 x 18 mm wird durch die standardisierte Anordnung der Reservoirs im Rastermaß der 384er Mikrotiterplatte und die notwendige Interaktion mit einem externen Piezoaktor vorgegeben. Grundlegende Anforderungen wie die leckagefreie Verbindung zwischen den Reservoirs und den entsprechenden Düsen, die Realisierung eines gedeckelten mikrofluidischen Kanalsystems sowie die Durchgängigkeit und Homogenität der Düsen wurden reproduzierbar umgesetzt. Durch entsprechende Nachbehandlung wurden die mikrofluidischen Strukturen mit entsprechenden Oberflächenfunktionalitäten versehen, die eine kapillare Befüllung der Düsen und den parallelen Ausstoß von Einzeltröpfchen nach dem etablierten TopSpot[®] Verfahren ermöglichen.

Abstract

We present a microfluidic all-polymer printhead as a cost-efficient alternative to its silicon/glass-equivalent. The printhead was fabricated using a combination of standard mechanical machining and photolithography, which is particularly suitable for large-scale components featuring micro through-holes. The printhead has 24 nozzles with a diameter of 50 µm, each connected to a corresponding reservoir by a microfluidic channel. All microstructures are patterned in TMMF dry film photoresist, the interface was fabricated in PMMA. The printhead has a large footprint, 36 x 18 mm, which is defined by the arrangement of the reservoirs according to the grid pattern of a 384 microtiter-plate and the required interaction with an external piezo actuator. Basic microfluidic requirements such as a leak-tight connection of each reservoir to its corresponding nozzle, fabrication of embedded microchannels and homogeneity of the nozzles could be reproducibly achieved. Surface treatment was performed in order to enable capillary transport of the fluid samples and the parallel ejection of single droplets according to the established TopSpot[®] principle.

1 Einleitung

Für viele mikrofluidische Anwendungen besteht Bedarf an Kunststoffbauteilen mit durchgehenden Öffnungen [1]. Solche Bauteile können zwar durch etablierte Abformverfahren wie Heißprägen oder Spritzgießen hergestellt werden, problematisch hingegen sind die hohen Anforderungen bezüglich der Abformgenauigkeit, Homogenität und der Kantenqualität der kleinen Öffnungen. Abweichungen, die für Bauteile wie Mikropumpen oder Mikroventile tolerierbar sind, können bei hochparallelen Dosiersystemen ein Ausschlusskriterium darstellen. Das für Kunststoffabformung charakteristische Auftreten von Schwin-

nung und Verzug der Formteile wird durch das relativ große Format der mikrofluidischen Bauteile zusätzlich verstärkt [2] und kann nur bei Großserienfertigung wirtschaftlich umgangen werden. Alternativ ermöglicht zwar das PDMS-Abgießen die schrumpffreie Fertigung von Mikrostrukturen auch in kleinen Stückzahlen, problematisch sind jedoch die unzureichende Langzeitstabilität der modifizierten Oberflächen und die mechanische Flexibilität von PDMS [3]. Ebenso verhält es sich mit der SU-8 Lithographie, die sich einerseits durch hohe Auflösung und Aspektverhältnisse auszeichnet, sich aber auf vorstrukturierten Substraten sowie für Mehrlagenprozesse und Deckelung von Kavitäten nur bedingt anwenden

lässt [4]. Eine Alternative zu gängigen Abformverfahren bietet die hier präsentierte Kombination aus spanabhebenden und lithographischen Verfahren. Diese Kombination wurde eingesetzt, um einen 24-kanaligen Nanoliter-Dispenser für das kontaktfreie Drucken von Microarrays herzustellen [5]. Durch den Einsatz dieser Technologie konnten aufwändige Reinraumprozesse wie Silizium-Trockenätzen oder anodisches Bonden durch kostengünstige Kunststoffverfahren effizient ersetzt werden.

2 Aufbau und Funktionsprinzip

Der 24-kanalige TopSpot® Druckkopf ist als Dreilagenvorbund aufgebaut. Im PMMA-Chipinterface befinden sich 24 Reservoirs, Düsenaufweitungen und das sog. Kolbenfenster. Die Eins-zu-Eins Formatwandlung der Mikrotiter-basierten Reservoiranordnung auf das 500 µm Raster des Microarrays erfolgt über die im Trockenlack eingebetteten mikrofluidischen Kanäle. Die Kanäle werden mit einer weiteren Trockenlackschicht gedeckelt, in welche auch die Düsen strukturiert werden. Jeder der 24 Kanäle verbindet ein Reservoir mit der entsprechenden Düse. Abbildung 1 zeigt den Aufbau und das Funktionsprinzip des Druckkopfs. Der Druckkopf wird piezopneumatisch über einen in das Kolbenfenster eingelassenen Kolben angesteuert. Ein Piezostapelaktor, der auf den Kolben wirkt, generiert einen Druckimpuls durch die Komprimierung des eingeschlossenen Luftvolumens und führt zum parallelen Ausstoß von einzelnen Tropfen mit einem Volumen von ca. einem Nanoliter aus jeder Düse.

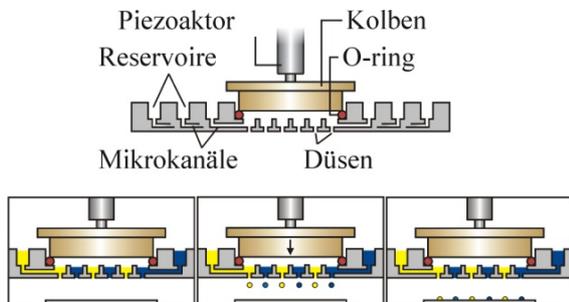


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Druckkopfaufbaus und des Funktionsprinzips

3 Design und Fertigung

Der Herstellungsprozess und die Detailabmessungen des Druckkopfs sind in Abbildung 2 dargestellt: Zunächst wurde eine 3 mm dicke PMMA-Platte durch Laserschneiden ins 4-Zoll-Waferformat überführt, so dass eine simultane Prozessierung von sechs Druckköpfen mit Außenabmessungen von jeweils 36 x 18 mm mit Standard Lithographieverfahren möglich ist. Anschließend wurden die PMMA-Substrate mittels spanabhebender Verfahren mit Reservoirs (Ø oben 8 mm, unten 0.2 mm), Kolbenfenster, Bohrungen oberhalb der Düsen (Düsenaufwei-

tungen, Ø 0.2 mm) sowie Säge- und Justagestrukturen für die nachfolgenden Lithographieschritte versehen. In einem Laminierprozess (DuPont Laminator, Riston HRL) wurden auf das vorstrukturierte Substrat zwei jeweils 55 µm dicke Lagen des Epoxid-basierten Trockenlacklacks TMMF appliziert. Die Rolltemperatur betrug dabei 60 °C bei einer Geschwindigkeit 1 m/min und einem Druck von 0.1 MPa. Die mikrofluidischen Kanäle wurden mittels UV-Lithographie im Kontaktmodus in das TMMF strukturiert (i-Line Filter, Belichtungs-dosis 150 mJ/cm², gedruckte Lithographie-Maske mit 8000 dpi Auflösung). Der Kanalquerschnitt beträgt 110 x 70 µm (Höhe x Breite). Um die während der Belichtung initiierte Vernetzungsreaktion zu komplettieren, wurde der Trockenlack 45 Minuten bei 90 °C getempert (Post-Exposure-Bake). Die nichtvernetzten Bereiche des Photolacks wurden durch Tauchentwicklung in propylene glycol methyl ether acetate (PGMEA) entfernt, abschließend wurde das Substrat mit deionisiertem Wasser gespült und trockengeschleudert.

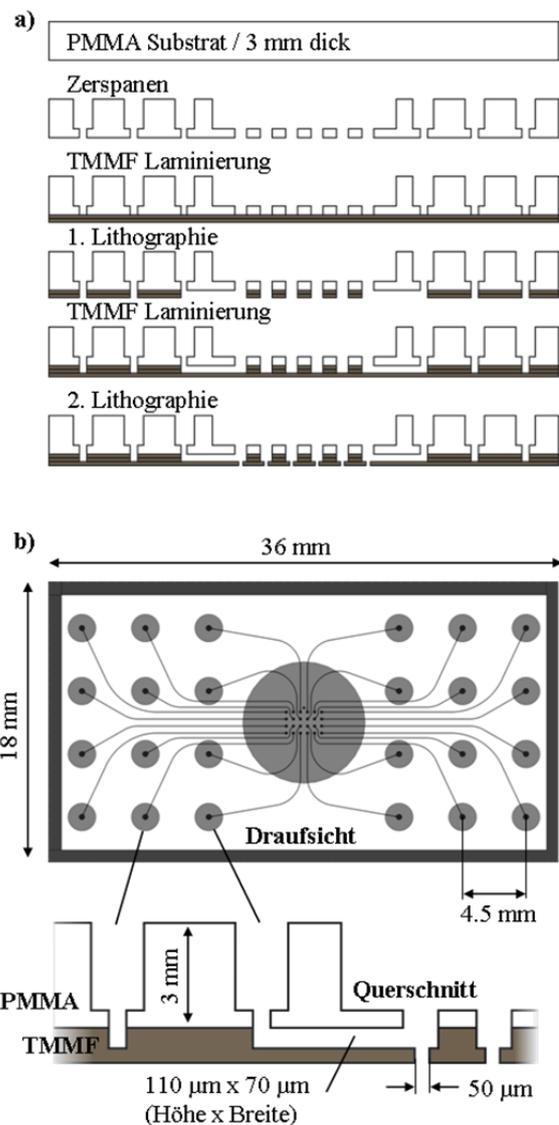


Abbildung 2: (a) Herstellungsprozess und (b) Detailabmessungen des Druckkopfes

Die mikrofluidischen Kanäle wurden durch Laminieren einer weiteren Lage des Trockenlacks gedeckelt. Das Düsenarray wurde in einem zweiten Lithographieschritt in der Deckelschicht strukturiert. Die Druckköpfe wurden mit einer konventionellen Wafersäge vereinzelt. Alternativ kann auch ein CO₂-Laser für die Vereinzlung verwendet werden.

4 Experimentelle Ergebnisse

Die grundlegenden Anforderungen an den hier präsentierten Prozess sind die Herstellung eines leakagefreien, mikrofluidischen Kanalsystems, die Durchgängigkeit, Homogenität und hohe Kantenqualität der Düsen sowie die Realisierung von Oberflächen mit hydrophilen und hydrophoben Eigenschaften. Abbildung 3 zeigt den fertigen PMMA/TMMF-Verbund vor dem Vereinzeln der einzelnen Druckköpfe. Der Kanalquerschnitt weist kein Durchhängen der Deckelfolie auf (Abb. 4a), die Dichtigkeit des mikrofluidischen Kanalsystems wurde durch Befüllen der Reservoirs mit Tinte geprüft (Abb. 4b), die hohe Kantenqualität und Homogenität der Düsen konnte mittels REM nachgewiesen werden (Abb. 4c).



Abbildung 3: PMMA/TMMF Verbund vor dem Vereinzeln.

In Vortests konnte die chemische Beständigkeit zwischen dem TMMF-Entwickler (PGMEA) und PMMA bestätigt werden. Ein Quellen des PMMA wurde erst nach einigen Stunden im Entwickler festgestellt. Die gute Adhäsion zwischen TMMF und PMMA sowie zwischen einzelnen TMMF-Schichten ermöglicht die mehrlagige Verbindung der einzelnen mikrofluidischen Ebenen (PMMA Chipinterface, Zwischenlage mit Mikrokanälen und Deckelschicht mit Düsen). Da die Benetzungseigenschaften des Trockenlacks entscheidend für die einwandfreie Funktion des Druckkopfs sind, wurden verschiedene Möglichkeiten zur Oberflächenmodifikation untersucht. Ausgehend von unbehandeltem TMMF mit einem statischen Kontaktwinkel von Wasser von ca. 80°, konnte der Kontaktwinkel

durch die Gasphasenabscheidung von octafluorocyclobutan (C₄F₈, teflonartig) in einem standard ICP-System auf 105° erhöht werden. Mit der Gasphasenabscheidung von (tridecafluoro-1,1,2,2-tetrahydrooctyl)-trichlorosilane (ABCR, Deutschland) in einem Exsikkator konnte ebenfalls ein Kontaktwinkel von 105° erreicht werden. Dadurch wurde ein Benetzen des Düsenbereichs während des Dosiervorgangs verhindert und das Abgeben von Einzeltropfen ermöglicht. Eine Behandlung mit Sauerstoffplasma dagegen (4 Minuten, 600 Watt) reduziert den Kontaktwinkel auf unter 20° und gewährleistet somit die einwandfreie kapillare Befüllung der mikrofluidischen Kanäle. Im Gegensatz dazu hatte eine Oberflächenbehandlung der TMMF Oberfläche mit Hexamethyldisilazan (HMDS) und 1H,1H,2H,2H-Perfluorodecyldimethylchlorosilane (ABCR, Deutschland) keinen Einfluss auf die Benetzungseigenschaften des Trockenlacks.

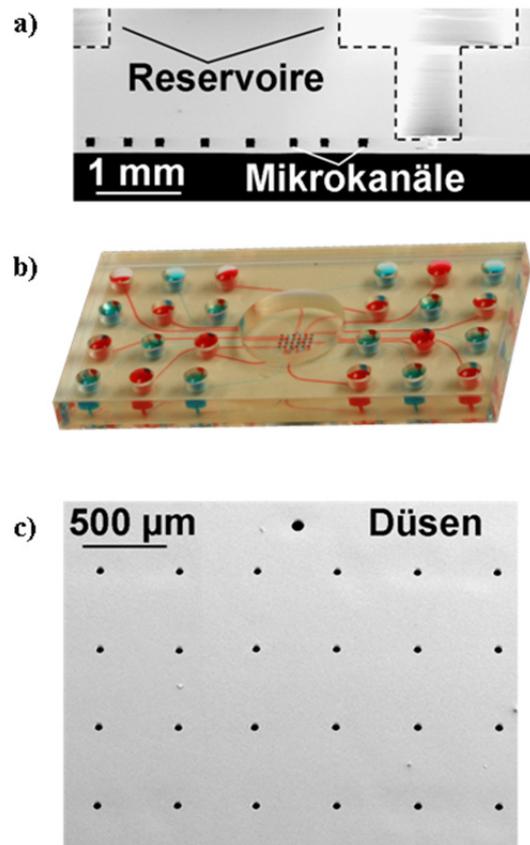


Abbildung 4: (a) Kanalquerschnitt, (b) Druckkopf befüllt mit Tinte zur Veranschaulichung der Kanaldichtigkeit, (c) REM-Aufnahme des Düsenarrays

Eine Mehrfachverwendung der Druckköpfe wird durch die chemische Beständigkeit gegen die im Reinigungsprozess eingesetzten Lösungen, 2 % (v/v) Hellmanex und 5 % (v/v) RBS, gewährleistet. Dies wurde in der entsprechenden Reinigungsstation experimentell nachgewiesen. In einem ersten Funktionstest wurde der Druckkopf unter Verwendung eines TopSpot[®] E-Vision Microarrays [6] bezüglich der satellitenfreien Dosierung mit Wasser erfolgreich getestet (Abb. 5).

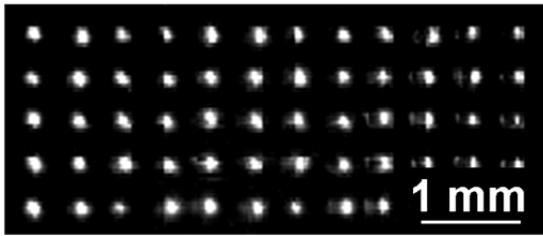


Abbildung 5: Dispensierte Nanoliter-Tropfen im 500 µm Raster

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Laminierbare Photolacke weisen über große Flächen eine homogene Schichtdicke und hohe Kantenqualität auf. Sie können auf vorstrukturierte Substrate appliziert werden, wobei darunterliegende Kavitäten ohne Durchhängen überbrückt werden. Die Dichtigkeit der mittels des untersuchten Trockenlacks TMMF hergestellten mikrofluidischen Kanäle wurde experimentell nachgewiesen. Die Oberflächeneigenschaften von TMMF konnten sowohl hydrophob als auch hydrophil modifiziert werden. In Kombination mit spanabhebenden Verfahren, die für die Herstellung der erforderlichen fluidischen Schnittstellen besonders geeignet sind, stellen Trockenlacke eine Fertigungsalternative für lagenweise aufgebaute mikrofluidische Systeme und großformatige Bauteile mit mikrostrukturierten Durchgangsöffnungen dar. Durch dieses Verfahren können kostenintensive Siliziumprozesse zur Herstellung von Durchgangsöffnungen (Trockenätzen) oder zum Verbinden von Schichten (anodisches Bonden) ersetzt werden. Zukünftige Herausforderungen liegen in der

Verbesserung der Reproduzierbarkeit und der Ausbeute, was insbesondere für kommerzielle Anwendungen wichtig ist. Die Untersuchung der chemischen Beständigkeit von TMMF gegenüber Probenlösungen und die Verbesserung der Langzeitstabilität der Oberflächenmodifizierungen stellen ebenso zukünftige Aufgaben dar, wie die anwendungsspezifische Charakterisierung des Tropfenflugs und die Optimierung der Antriebsparameter.

Literatur

- [1] C. Mehne: Großformatige Abformung mikrostrukturierter Formeinsätze durch Heißprägen; Dissertation Universität Karlsruhe (TH), Juli 2007.
- [2] M. Hecke und W. K. Schomburg: Review on micromolding of thermoplastic polymers; *J. Micro-mech. Microeng.* 14 (2004) R1-14.
- [3] R. Mukhopadhyay: "When PDMS isn't the best"; *Anal. Chem.*; vol. 79, pp. 3248-3253; 2007.
- [4] P. Abgrall, V. Conedera, H. Camon, A. M. Gue, N. T. Nguyen: "SU-8 as a structural material for lab-on-chips an microelectromechanical systems"; *Electrophoresis*; pp. 4539-4551; 2007.
- [5] BioFluidix GmbH, TopSpot® Technologie, <http://www.biofluidix.com/>, 28. Jul. 2011.
- [6] BioFluidix GmbH, TopSpot® - E Vision http://www.biofluidix.com/uploads/media/TopSpot_E-Vision_02.pdf; 28. Jul. 2011