

# Fertigung von Hybriddruckköpfen aus Silizium und Kunststoff

## Fabrication of hybrid printheads using silicon and plastic

Kiril Kalkandjiev<sup>1\*</sup>, Roland Zengerle<sup>1</sup>, Peter Koltay<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> BioFluidix GmbH, Georges-Köhler-Allee 106, 79110 Freiburg

\* kiril.kalkandjiev@imtek.de

### Kurzfassung

Wir präsentieren einen Ansatz für die hybride Fertigung von mikrofluidischen Produkten durch die Integration von Silizium- und Kunststoffkomponenten. Der Ansatz ist besonders für die kostengünstige Herstellung von Produkten geeignet, bei welchen hochpräzise Siliziumstrukturen mit anderen, großflächigen Komponenten verbunden werden sollen. Wir demonstrieren das Potential dieser Technik anhand der Fertigung eines 24-kanaligen Druckkopfs für die Herstellung von Microarrays mittels der TopSpot Technologie. Der Hybriddruckkopf ist dreilagig aufgebaut und besteht aus einer Reservoirplatte aus Cyclo-Olefin-Copolymer (COC), einem Siliziumchip mit mikrofluidischen Strukturen und einer Deckelschicht aus epoxybasiertem Trockenresist (TMMF). Diese Materialkombination führt zu einer Reduzierung der Herstellungskosten um mehr als 50 % im Vergleich zu kommerziell verfügbaren Druckköpfen in Silizium-Glas-Technik [1] bei gleichbleibender Performance. Der hybride Fertigungsansatz kann somit als eine kostengünstige Alternative und Ergänzung zu den klassischen Materialien und Prozessen der Mikrosystemtechnik angesehen werden.

### Abstract

We present a hybrid approach for the fabrication of microfluidic devices based on the integration of silicon and polymer materials. The approach has proven to be suitable for the low-cost fabrication of devices which combine high-precision silicon structures with large-scale components. The potential of this technique is demonstrated by the fabrication of a 24-channel TopSpot printhead. The hybrid printhead consists of a reservoir interface fabricated in Cyclic Olefin Copolymer (COC), a silicon layer holding microfluidic structures and a sealing lid made of the epoxy-based dry-photoresist TMMF. Compared to the well established TopSpot printheads based on silicon/glass [1], the performance of the hybrid dispenser remained unaffected while fabrication costs were reduced by more than 50 %. Thus, the hybrid approach can be considered as an advantageous alternative and extension to standard MEMS technologies and materials.

## 1 Einleitung

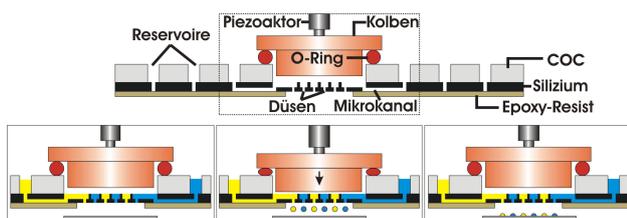
In den letzten Jahren entfernte sich der Trend in der Entwicklung von mikrofluidischen Produkten von der klassischen Mikrostrukturierung in Silizium und Glas und wandte sich hin zu Einwegprodukten aus thermoplastischen Kunststoffen, PDMS oder SU-8 [2,3,4]. Die Einführung von Polymeren in die Mikrofluidik ermöglichte eine größere Designfreiheit sowie günstige und schnelle Fertigung bei hohen Stückzahlen und hatte einen wesentlichen Einfluss auf die Forschung und Entwicklung im Bereich der Lebenswissenschaften. Dennoch, bestimmte Anwendungen setzen Materialeigenschaften oder Fertigungsgenauigkeiten voraus, die nur durch Mikrostrukturierung in Silizium gewährleistet werden können. Mikrofluidische Siliziumchips können in kleinen bis mittleren Stückzahlen günstig und mit hoher Ausbeute durch etablierte Reinraumprozesse wie das reaktive Ionenätzen (DRIE) hergestellt

werden. Ein erheblicher Teil der Fertigungskosten für marktfähige Produkte entsteht dabei nicht nur durch die Strukturierung in Silizium, sondern auch durch die nachfolgende Fertigung der benötigten Schnittstellen (macro-to-micro-Interface), von Deckelstrukturen und durch die Aufbau- und Verbindungstechnik. Die Schnittstellen sind erforderlich, um das Arbeiten mit üblichen Laborgeräten wie Pipetten oder Pumpen zu ermöglichen. Das dauerhafte Deckeln von Kanälen ist für die Fertigung von Mikrokapillaren essentiell und stellt somit eine der Schlüsselfragen und technologischen Herausforderungen im Bereich Mikrofluidik dar. Wegen des Siliziumkerns im Chip fällt die Materialauswahl für Schnittstellen und Deckelstrukturen oft auf Pyrexglas, welches ohne zusätzliche Kleberschicht mit Silizium durch anodisches Bonden irreversibel verbunden werden kann. Das anodische Bonden und das Vereinzeln des so entstandenen Stapels bilden jedoch einen weiteren Kostenfaktor, der im Einzelfall mehr als die Hälfte der gesamten Fertigungskosten verursachen kann. Der in diesem Paper präsentierte Ansatz für die hybride Fertigung

von mikrofluidischen Produkten vereint die Fertigungsvorteile der Silizium-Mikromechanik mit den Kostenvorteilen der Polymerstrukturierung. Der Ansatz wurde für die Fertigung von 24-kanaligen TopSpot Druckköpfen eingesetzt, bei welchen das ursprüngliche Glas-Interface und die Glas-Deckelschicht durch geeignete Kunststoffe sowie das anodische Bonden durch alternative Fügeverfahren ersetzt wurden, um eine Kostenreduzierung um mehr als 50% zu erzielen.

## 2 Funktionsprinzip

Der Kern der TopSpot Technologie ist ein Druckkopf, der pneumatisch mittels eines Piezoaktors betätigt wird und die kontaktfreie Dosierung von Flüssigkeiten im Pico- bis Nanoliterbereich ermöglicht [1]. Der Druckkopf ist dreilagig aufgebaut und besteht aus einem Interface mit 24 oder 96 Reservoiren für die verschiedenen Dispensiermedien, einer Zwischenlage mit mikrofluidischen Strukturen und einer Deckelschicht (**Bild 1**). Die Hauptvorteile des Systems sind die Möglichkeit bis zu 96 verschiedene Medien simultan zu dosieren und die Eins-zu-Eins Formatwandlung von der Mikrotiterplatten-basierten Reservoiranordnung zum 500 µm Raster des gedruckten Microarrays. Die Formatwandlung findet in der Zwischenlage statt und wird durch Mikrokanäle ermöglicht, die jedes Reservoir mit der dazugehörigen Abgabestelle (Düse) verbinden. Nach dem Befüllen der Reservoirs mit den zu dosierenden Medien werden diese über Kapillarkräfte zu den entsprechenden Düsen transportiert. Die Tropfen werden mittels eines Piezoaktors ausgelöst, der einen Kolben über dem Düsenarray in Bewegung versetzt. Der so generierte Kolbenhub komprimiert das eingeschlossene Gasvolumen über den Düsen, der Druckimpuls wird an die zu dosierenden Medien weitergegeben und verursacht den simultanen Abriss von einem Einzeltropfen aus jeder Düse. Aufgrund der Kapillarität befüllen sich die Düsen wieder selbstständig, und ein weiterer Dispensiervorgang kann durchgeführt werden.

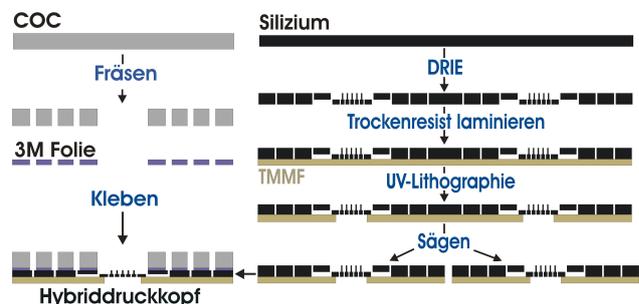


**Bild 1** Schematische Darstellung des Hybriddruckkopfs und des Arbeitsprinzips

## 3 Fertigung in Hybridtechnologie

Der Prozessablauf für die Fertigung der Hybriddruckköpfe ist in **Bild 2** dargestellt. Als Erstes wurden die mikrofluidischen Kanäle (Querschnitt 70x80 µm<sup>2</sup>) und Düsen (Durchmesser 50 µm) hergestellt. Aufgrund der hohen Anforderung im Bezug auf das reproduzierbare Volumen der dispensierten Medien wurden diese Strukturen in Silizium durch reaktives Ionentiefenätzen strukturiert, wodurch eine

höchst präzise und gleichmäßige Geometrie der Düsen gewährleistet werden kann. Anschließend werden die mikrofluidischen Kanäle durch Laminieren des negativen Trockenlacks TMMF (TOK, Japan) auf dem vorstrukturierten Siliziumwafer verschlossen. Der Laminierprozess wurde an einem Gerät der Fa. DuPont (Riston HRL) unter Verwendung von Temperatur (60 °C) und Druck (ca. 2 bar) bei einer Walzengeschwindigkeit von 1 m/min durchgeführt. Die Hauptvorteile bei der Anwendung des Trockenlacks liegen in der Möglichkeit mikrofluidische Kanäle zu deckeln und dem selektiven Abheben der Deckelschicht vom Düsenbereich durch einen einzigen Lithographieschritt (i-line, 150 mJ/cm<sup>2</sup>) auf Waferebene. Zum Vernetzen des Trockenlacks wurde der Wafer auf einer Hotplate temperiert (10 Minuten bei 90 °C und 50 Minuten bei 150 °C) und anschließend für 10 Minuten in SU-8 Entwickler getaucht, mit DI-Wasser gespült und trocken geschleudert. Der so entstandene Silizium/TMMF-Verbund wurde vereinzelt und unter Verwendung einer doppelseitig mit drucksensitivem Kleber beschichteten Folie (3M, 9965) mit dem Reservoir-Interface verbunden. Das Interface ist 2 mm dick und wurde aus COC (Topas 5013) durch konventionelles Fräsen hergestellt. Vor dem Kleben wurde die 3M Folie mittels CO<sub>2</sub>-Lasers strukturiert, um den Kanaleinlauf am Übergang Reservoir-Kanal zu öffnen. Der drucksensitive Kleber der 3M Folie lässt eine Nachjustage der zu verbindenden Komponenten zu und das Ausrichten kann ohne zusätzliche Justagevorrichtungen manuell präzise durchgeführt werden.



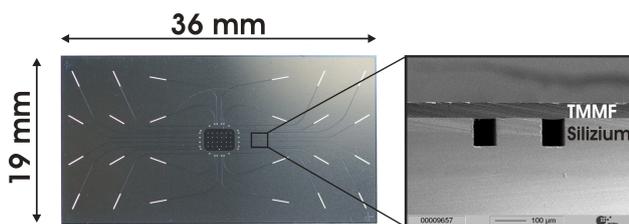
**Bild 2** Prozessablauf für die Fertigung der Hybriddruckköpfe

Die einzelnen Schritte bei der Fertigung der Hybriddruckköpfe können folgendermaßen zusammengefasst werden:

1. Fertigung der mikrofluidischen Strukturen in Silizium mittels DRIE
2. Laminieren von TMMF zum Deckeln der Kanäle
3. UV-Lithographie zum Abheben der Deckelschicht vom Düsenarray
4. Vereinzeln des Silizium/TMMF Verbunds
5. Herstellen des Reservoir-Interfaces durch Fräsen in COC
6. Strukturieren der 3M Folie
7. Verkleben der vereinzelt Chips und des COC-Interfaces auf Chip-Ebene

## 4 Experimentelle Ergebnisse

Grundlegende Anforderungen wie das flüssigkeitsdichte Deckeln der Kanäle, das vollständige Abheben der Deckelschicht vom Düsenarray und der kontaminationsfreie Transport der Medien von den Reservoirs zu den entsprechenden Düsen wurden reproduzierbar erfüllt. REM-Aufnahmen der Kanalquerschnitte zeigen kein Verstopfen der Kanäle und kein Durchhängen der Deckelfolie (**Bild 3**). Auf der Reservoirseite wurden kleine Toleranzen in der Planarität der COC-Teile durch die 18 µm dicke Kleberschicht der 3M Folie kompensiert und somit der ganzflächige Kontakt mit dem Siliziumchip sicher gewährleistet. Die Ausbeute bei der Fertigung der Hybriddruckköpfe liegt bei – manuelle Handhabungsfehler ausgenommen – nahezu 100 %.



**Bild 3** Düsenseite des Hybriddruckkopfs und REM-Aufnahme des Kanalquerschnitts

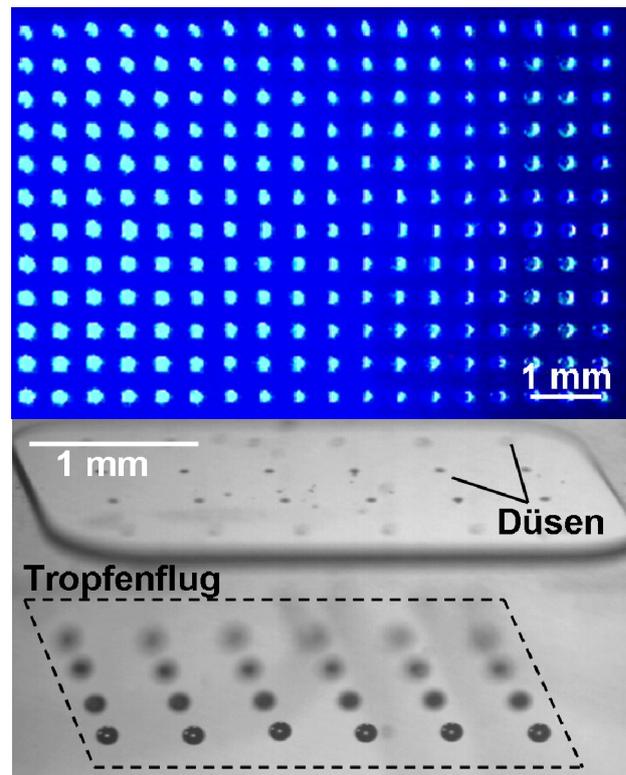
Zur weiteren Charakterisierung der Hybriddruckköpfe wurde ein Microarray Printer der Fa. BioFluidix verwendet (TopSpot E-Vision, **Bild 4**). Die Geräte der E-Vision Familie verfügen über eine integrierte optische Qualitätskontrolle und erlauben die Abbildung jedes Tropfenarrays unmittelbar nach dem Drucken sowie die Aufnahme stroboskopischer Bilder von fliegenden Tropfen zum Einstellen der optimalen Druckparameter [5].



**Bild 4** Microarray-Drucker der Firma BioFluidix mit integrierter optischer Qualitätskontrolle

Die ersten Druckversuche mit verschiedenen DNA- und Proteinlösungen präsentierten eine vergleichbare Effizienz wie die etablierten TopSpot Druckköpfe in Silizium-Glas Technik (**Bild 5 oben**). Im Rahmen der Charakterisierung

der Hybriddruckköpfe wurden insbesondere auch der Tropfenabriss und Tropfenflug mittels eines stroboskopischen Messaufbaus im Detail untersucht. Dabei wurden ein reproduzierbarer satellitenfreier Tropfenabriss sowie ein gleichmäßiger Flug aller 24 Tropfen festgestellt (**Bild 5 unten**). Die Hybriddruckköpfe wurden nach jedem Gebrauch einer Reinigungsprozedur unterzogen, bei welcher Reservoirs, Kanäle und Düsen mit DI-Wasser und anschließend mit 5%-iger RBS Reinigungslösung bei 80°C im Ultraschallbad durchspült wurden. Dadurch konnten die Druckköpfe ohne Verschleppung von Medien aus dem vorherigen Druckvorgang weiter benutzt werden. Die mechanische, thermische und chemische Stabilität der Hybriddruckköpfe lassen eine mehrmalige Benutzung zu und prädestinieren sie für den Einsatz als Semi-Disposables.



**Bild 5** Oben: Mit einem Hybriddruckkopf gespottete DNA-Oligonukleotide auf epoxybeschichteten Objektträgern (Tropfenvolumen 1 nL). Unten: Stroboskopische Aufnahme des Tropfenfluges

## 5 Schlussfolgerungen

Mit dem präsentierten Fertigungsansatz konnten wir die Reservoirs aus Pyrex-Glas und die Glas-Deckelschicht der etablierten TopSpot Druckköpfe durch Kunststoffmaterialien ersetzen. Kostengünstigere Hybriddruckköpfe wurden durch die Kombination von Silizium mit COC Kunststoff und TMMF hergestellt. Die ersten experimentellen Ergebnisse zeigen, dass ihre Tropfenhomogenität und Einsatzbereich den durch die Standarddruckköpfe in Silizium/Glas Technik gesetzten Anforderungen entsprechen. Ein wichtiger Vorteil des hybriden Fertigungsansatzes liegt in sei-

ner Flexibilität, die eine einfache Anpassung an geänderten Designanforderungen ermöglicht und ihn für weitere Anwendungen und Produkte einsetzbar macht. Der Ansatz stellt somit eine Alternative zu traditionellen Reinraumprozessen dar und ermöglicht eine erhebliche Reduzierung der Kosten für die Prototypen- und Serienfertigung von mikrofluidischen Produkten.

## 6 Danksagung

Die hier vorgestellten Forschungsarbeiten wurden in Zusammenarbeit mit der Micro Mountains Applications AG und mit Unterstützung des BmBF durchgeführt.

## 7 Literatur

- [1] P. Koltay, R. Zengerle, *The TopSpot<sup>®</sup> - Microarrayer: An example for high priced micromachined components creating added value*, 10<sup>th</sup> International Conference on the Commercialization of Micro and Nano Systems (COMS), Baden-Baden, Germany, August 21-25, 2005, pp. 364-367
- [2] H. Becker and C. Gärtner; *Polymer microfabrication methods for microfluidic analytical applications*; Electrophoresis; vol. 21; pp. 12-26, 2000
- [3] D. C. Duffy, J. C. McDonald, O. J. A. Schueller, G. M. Whitesides; *Rapid Prototyping of Microfluidic Systems in Poly(dimethylsiloxane)*; Analytical Chemistry; vol. 70, p. 4974-4984, 1998
- [4] P. Abgrall, V. Conedera, H. Camon, A. M. Gue, N. T. Nguyen; *SU-8 as a structural material for labs-on-chips and microelectromechanical systems*; Electrophoresis, vol. 28, pp. 4539-4551, 2007
- [5] N. Wangler, R. Zengerle, P. Koltay; *Optische Qualitätskontrolle für hoch parallelen TopSpot Microarray Printer*; Mikrosystemtechnik Kongress, Dresden, 15.-17. Oktober, 2007, pp. 869-872