

## ERZEUGUNG VON MIKROTROPFEN AUS FLÜSSIGEM LÖTZINN MITTELS EINER HOCHPARALLELEN UND KONTAKTLOSEN DRUCKTECHNIK

Dipl.-Ing. (FH) Dietmar Schuhmacher<sup>1</sup>, Dipl. -Phys. Hermann Scheithauer<sup>1</sup>, Dr. Mani Alavi<sup>1</sup>,  
Dipl.-Ing. Remigius Niekrawietz<sup>2</sup>, Dr. Bas de Heij<sup>2</sup>, Prof. Roland Zengerle<sup>1,2</sup>, Dr. Peter Koltay<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut für Mikro- und Informationstechnik der Hahn-Schickard-Gesellschaft (HSG-IMIT), Wilhelm-Schickard-Strasse 10, 78052 Villingen-Schwenningen, Deutschland

<sup>2</sup> Universität Freiburg, Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK), Lehrstuhl für Anwendungsentwicklung Georges-Köhler-Allee 106, 79110 Freiburg, Deutschland

### Kurzfassung

Wir präsentieren einen Dispenser zum Drucken von flüssigem Lötzinn mit einer wieder verwendbaren und auswechselbaren Düsenplatte aus Silizium. Diese besitzt typischerweise zwischen 1 und 30 Düsen mit 50 µm Durchmesser, welche in speziellen anwendungsspezifischen Designs angeordnet sind. Dies ermöglicht ein schnelles Umrüsten auf verschiedenste Pad-Layouts, wobei die Kosten für die einzelnen mikrobearbeiteten Düsenplatten relativ gering bleiben.

## 1 Einführung

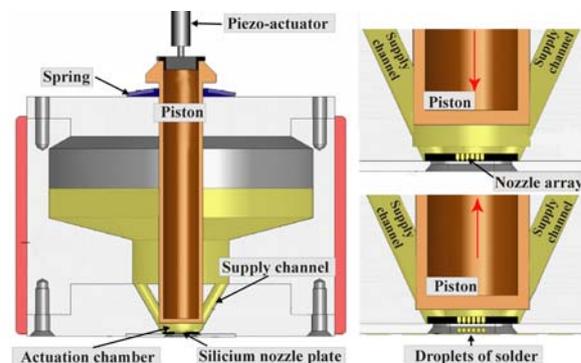
Moderne Packaging-Verfahren wie "Tape Automatic Bonding" (TAB) "Chip Size Packaging" (CSP) und "Flip Chip" (FP) benötigen als elektrische und mechanische Verbindungselemente, sowie als Abstandhalter Lotkügelchen (Bumps). Diese Verbindung zwischen Mikrochip und Substrat ist einer der kritischsten Faktoren eines jeden Flip Chip Aufbaus. Bewährte Techniken wie das galvanische Abscheiden und der Schablonendruck setzen lithographische Prozessschritte voraus, welche die Kostenanforderungen für die Kleinserie oder die Anforderungen von ultra-fine-Pitch Strukturen nicht erfüllen können. Diese werden beispielsweise beim Chip-Bonding auf flexible Substrate bei der Produktion von Smart Cards und Smart Labels gefordert. Hier wird ein paralleler, flexibler und billiger Prozess benötigt. Das simultane Absetzen von Bumps ohne einen lithographischen Prozessschritt ermöglicht eine signifikante Kostenreduktion. Somit ist das „Solderbumping“ die Schlüsseltechnologie bei der Umsetzung des flexiblen Flip-Chip-Aufbaus.

## 2 Prinzip und Design

### 2.1 Tropfengenerierung

Beim folgenden Gerät wird das Lötzinn über das Prinzip der direkten Flüssigkeitsverdrängung dispensiert. Eine mikrotechnologisch hergestellte Silizium-Düsenplatte wird direkt in das Druckmodul integriert, wie in **Bild 1** zu sehen ist. Das Lötzinn wird im festen Zustand bei Raumtemperatur in den Dispenser eingebracht. Eine elektrisch geregelte Ringheizung heizt das gesamte Modul auf und verflüssigt somit das Löt-

zinn auf die Arbeitstemperatur von 360°C. Wenn das Lötzinn verflüssigt ist, kann der Kolben zum Tropfenausstoß (siehe Abbildung 1) eingesetzt werden. Ein thermisch entkoppelter Piezo-Stack-Aktuator lenkt den Kolben mit Hochgeschwindigkeit bis zu 10 µm aus.

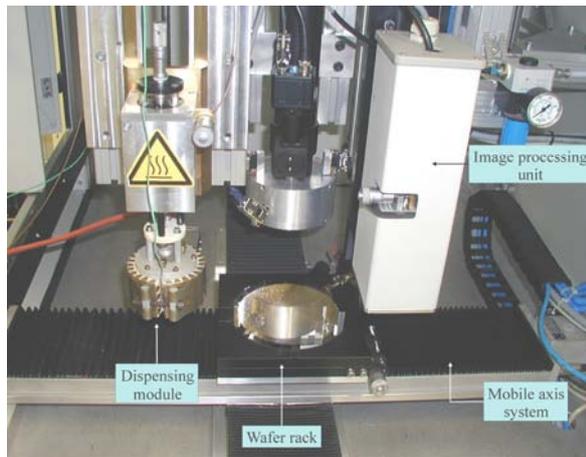


**Bild 1** Grundprinzip des Dispensers (schematischer Querschnitt)

Die Auslenkung des Kolbens bewirkt eine Volumenverdrängung in der Druckkammer, die auf alle Düsen gleichzeitig einwirkt. Somit werden aus allen Düsen gleichzeitig Tropfen ausgestoßen. Nachdem die Tropfen abgerissen sind ermöglicht die Rückstellung des Kolbens das Wiederbefüllen der Düsen durch die Zuführungskanäle über den hydrostatischen Druck.

Das elektrische Signal zur Ansteuerung des Piezoaktuators wird von einem extra für diesen Zweck entwickelten elektronischen Verstärker generiert. Um bei diesem Verstärker ein hysteresefreies Aufladen zu erreichen, wird der Strom über einen Mikrocontroller gesteuert. Zu dessen Adressierung wird ein eigener Befehlssatz verwendet und die Kommandos über eine RS232 Verbindung übertragen. Die kürzeste An-

sprechzeit, die der Mikrocontroller bewältigen kann, liegt bei  $1 \mu\text{s}$ . Infolge dessen ist die kürzest mögliche Dauer der Plateauphase  $10 \mu\text{s}$ . Dies ist die Dauer, die der Mikrocontroller für die Bearbeitung aller notwendigen Sicherheitsabfragen benötigt, nachdem die Auslenkungsphase beendet ist. Da sehr hohe Ströme (bis zu mehreren Ampère) in sehr kurzer Zeit zur Verfügung stehen, kann somit eine große Menge an Energie sofort abgerufen werden. Dies wird durch einen Kondensator mit  $1000 \mu\text{F}$  gewährleistet.



**Bild 2** Prototyp des kontaktlosen Dispensers an der Z-Achse montiert

Durch Aufladen des Piezoaktuators über ein typisches Signal (**Bild 3**), bewegt sich der Kolben in Richtung der Düsen. Die auftretende Volumenverdrängung führt zu einer Beschleunigung der Flüssigkeit in Richtung der Düsen sowie zu einem Überdruck in der Druckkammer oberhalb der Düsen. Wenn der erzeugte Druck innerhalb des Druckmoduls groß genug ist, um die Reibungsverluste zu überwinden und die kinetische Energie ausreicht, um die Oberfläche eines Tropfens zu bilden, werden frei fliegende Tröpfchen aus allen Düsenöffnungen gleichzeitig abgegeben. Die mechanische Kopplung zwischen Piezoactuator und Kolben wird durch eine Tellerfeder hergestellt. Deshalb fährt der Kolben wieder in seine Ausgangsposition zurück, nachdem der Piezo langsam entladen wurde. Anschließend befüllen sich die Düsen über das Lotreservoir durch hydrostatischen und kapillaren Druck.

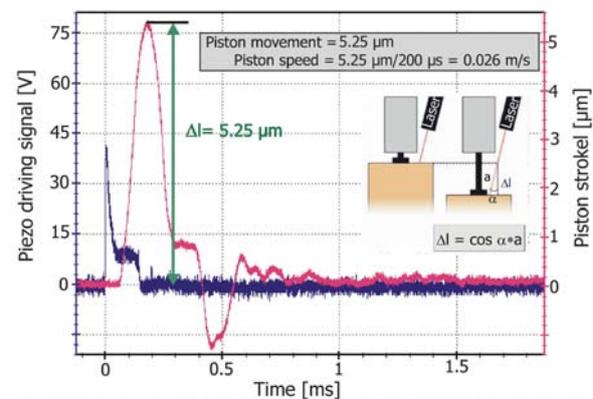
Für die Dispensierexperimente wurde das gesamte Dispensiermodul an einem automatisierten Achsen-system befestigt, sodass dass 4 Inch full Wafer Substrate präzise unter den Düsen positioniert werden konnten (**Bild 2**). Auf diese Weise wurden bleifreie Lottropfen auf Full-Wafer-Scale im Step-and-Repeat-Verfahren abgegeben. In allen Experimenten wurde das bleifreie Lot SAC 405 (95,5 % Sn, 0,5 % Ag, 0,5 % Cu) genutzt. Die typische Distanz zwischen Düsenplatte und Substrat betrug  $500 \mu\text{m}$ . Das Substrat wurde während der Bumpingexperimente aktiv beheizt.

### 3 Experimente und Ergebnisse

Das vorgestellte Dispensiermodul wurde experimentell charakterisiert, um den Einfluss der Ansteuerparameter in Bezug auf den Tropfenbildungsprozess und dabei insbesondere auf die Tropfengröße und die Tropfengeschwindigkeit zu untersuchen. Dafür wurden der Kolbenhub, der Tropfenabriss sowie das Tropfenvolumen mit zusätzlichen Geräten wie einem Laser-Doppler-Vibrometer (OTV 1102, Polytec), einer Videostroboskopkamera (Mocon-RT, Visit GmbH) und einer Präzisionswaage (Sartorius SC2), wie im Folgenden beschrieben, analysiert.

#### 3.1 Kolbenbewegung und Einschwingverhalten

Zur Messung der Kolbenbewegung und dessen Einschwingverhalten wurde das Laser-Doppler-Vibrometer verwendet. Aufgrund des Aufbaus des Dispensiermoduls konnte der Laser nicht parallel zur Auslenkung des Piezos montiert werden. Der Laser muss somit mit einem Winkel  $\alpha$  an die Kolbenbewegung angepasst werden. Dies bedeutet, dass die gemessenen Ergebnisse mit einem Korrekturfaktor multipliziert werden müssen, um den senkrechten Kolbenhub, wie in Abbildung 3, zu erhalten.



**Bild 3** mit Laser-Doppler-Vibrometer gemessene Kolbenbewegung sowie das Ansteuersignal des Piezos

**Einschub:** schematische Korrekturmethode, wenn der Laser nicht parallel zur Piezoauslenkung ausgerichtet werden kann

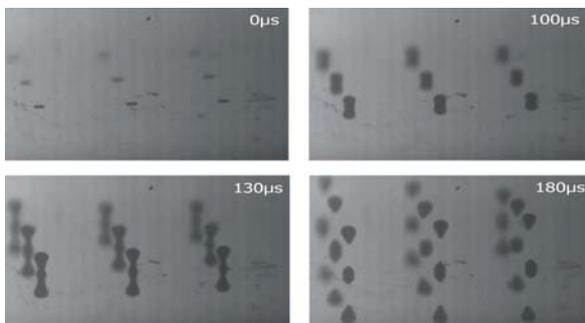
Vor den eigentlichen Dispensierversuchen wurde die Tellerfeder, über die mittels einer Mikrometerschraube der Kolben zur mechanischen Kopplung von Kolben und Piezo vorgespannt werden kann, angepasst. Die Experimente haben gezeigt, dass eine geringe Vorspannung ein Ablösen des Kolbens vom Piezo nicht verhindern kann und somit der Kolben anfängt zu fliegen.

Dem gegenüber kann eine große Vorspannung zwar den Kolbenflug unterdrücken jedoch wird die vorge-

gebene Kolbenauslenkung nicht erreicht. Der Piezo-aktuator kann durch die hohe Konterkraft dem vorgegebenen Signal nicht folgen. Demzufolge muss der Kolben moderat vorgespannt werden, um einerseits den Kolbenflug zu unterdrücken und andererseits dem vorgegebenen Signal folgen zu können. Das beste erreichte Einschwingverhalten ist in Abbildung 3 dargestellt. Obwohl ein geringfügiger Kolbenflug beobachtet wurde, konnte eine satellitenfreie Einzeltropfendispension gewährleistet werden.

### 3.2 Tropfenausstoß und Tropfenabriss

Eine gebräuchliche Methode, den Tropfenausstoß und seinen Abriss zu beobachten, ist ihn mit einer Kamera aufzunehmen. Da der komplette Ablauf nur ca. 2 ms dauert, muss eine Hochgeschwindigkeitskamera benutzt werden. Die Tatsache, dass der Ausstoßprozess für das dargestellte Verfahren in hohem Maße reproduzierbar ist, vereinfacht den Aufnahmeprozess und erlaubt es, eine stroboskopische Technik zu benutzen, bei der nur eine Momentaufnahme mit einer definierten Zeitverzögerung gemacht wird. Die Kamera, die zu diesem Zweck eingesetzt wurde, war eine Mocon-RT der Visit GmbH. Die optische Vergrößerung ist mit einem 2.0x Mikroskopobjektiv realisiert worden, auf das die Kamera montiert wurde. Die Piezo-Steuerelektronik erstellt ein Triggersignal, um die Dispension mit der Auslösung der Kamera zu synchronisieren. Die Bildsequenz kann gespeichert, zu einem Film zusammengefügt oder mit Standardbildbearbeitungsprogrammen analysiert werden.



**Bild 4** Beispiel einer stroboskopischen Bildsequenz eines 3x3 Tropfen Arrays zur Bestimmung der Tropfengeschwindigkeit. Grund für die zusätzlich zu sehenden Tropfen sind Spiegelungen an der Silizium Düsenplatte. In der rechten oberen Ecke ist das Delay Inkrement  $\Delta t$  eingeblendet.

Zur Gewährleistung eines satellitenfreien Einzeltropfenabrisses wurden stroboskopische Bilder (**Bild 4**) aufgenommen und ausgewertet, um die Geschwindigkeit der Tröpfchen zu bestimmen. Die Geschwindigkeit kann mit Hilfe der Tropfenposition auf den Bildern und der bekannten Zeitdifferenz zwischen den aufeinanderfolgenden Bildern berechnet werden, indem die folgende Formel benutzt wird:

$$v_d = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1}$$

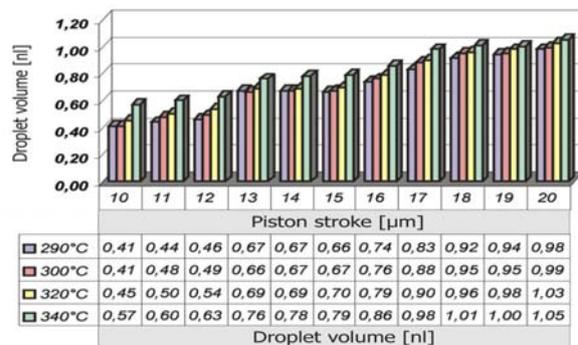
Das Resultat der Versuche war, dass die Geschwindigkeit der dispensierten Tropfen durch die Variation des Ansteuersignals im Bereich von 1-2 m/s geregelt werden kann. Die Größe des Ladestroms ist in diesem Zusammenhang die dominante Größe.

### 3.3 Tropfenvolumen

Tropfen im Nanoliterbereich zu messen ist keine triviale Aufgabe. Ein unkomplizierter Ansatz, das Volumen eines abgegebenen Tropfens zu bestimmen, ist, ihn auszuwiegen. Dies ist eine sichere und einfach zu handhabende Messmethode. Über die Dichte des Mediums wird das Volumen mit der folgenden Formel berechnet:

$$V_d = \frac{m_d}{\rho_d}$$

Mit dem Index d wird der Tropfen und mit m das dispensierte Medium repräsentiert. Um das Tropfenvolumen zu bestimmen, wurde folgender Ablauf durchgeführt: 20 Lötzinn-Tropfen wurden auf eine Aluminiumfolie aufdispensiert; das Gewicht der Aluminiumfolie (Tara Gewicht) war zuvor mittels einer Sartorius SC2 Waage bestimmt worden.



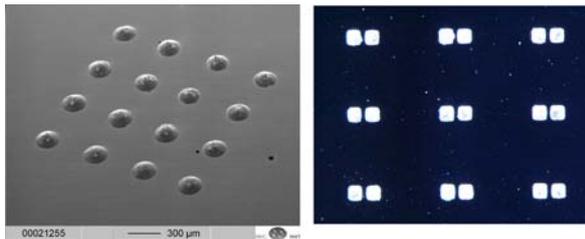
**Bild 5** Tropfenvolumen für verschiedene Temperaturen und Kolbenhübe

Nach dem Wiegen der Aluminiumfolie zusammen mit den Tropfen konnte das durchschnittliche Volumen der Tropfen bestimmt werden.

Im Experiment wurde der Piezo-Hub in 1-µm-Schritten von 10 bis 20 µm verändert. Die dabei jeweils abgegebenen Volumina bei verschiedenen Temperaturen sind in **Bild 5** dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass das Tropfenvolumen durch den Piezo-Hub und die Temperatur im Bereich von 0,4 nl bis zu 1 nl kontrolliert werden kann. Beides, sowohl der Piezo-Hub als auch die Arbeitstemperatur stellen einen ungefähr linearen Einfluss auf das Dosiervolumen dar.

### 3.4 Waferbumping als abschließendes Experiment

Der endgültige Test des entwickelten Lotdispensers ist das Herstellen von Lotbumps, welche anschließend zum Flip-Chip-Bonding verwendet werden können. Für die Bumping-Experimente wurde ein Tropfenvolumen von 500 pl eingestellt. Das Lot wird somit im flüssigen Zustand auf den Siliziumwafer aufdispensiert. Mit dem in Abbildung 2 gezeigten Setup war es möglich, ansehnliche Lottropfen (**Bild 6**) auf ein mit Gold beschichtetes, beheiztes Substrat zu dispensieren.



**Bild 6** REM-Aufnahme eines 4x4 Arrays, das simultan auf eine beheizte Goldoberfläche gedruckt wurde

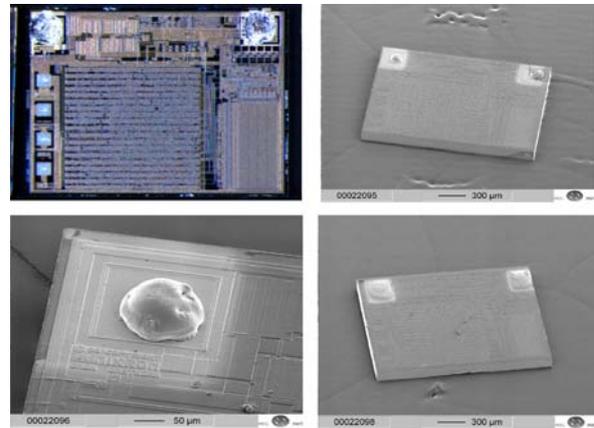
rechts: simultan gedrucktes Array auf Kontaktpads nach einem Reflow-Prozess. Die Geometrie der Düsen auf der Düsenplatte ist identisch mit der Pad-Anordnung eines Mikrochips der Bezeichnung LEGIC MIM 256

Weitere Experimente wurden mit einer kleinen Charge Mikrochips durchgeführt. Hierfür wurden komplett prozessierte Chips der Marke LEGIC MIM 256 auf dem Waferhalter platziert und azimuthal zum Dispensiermodul ausgerichtet. Ungefähr 200 µs nachdem der Piezostack betätigt wurde, trifft das flüssige Lot auf der mit 1 µm Gold überzogenen Multilayerschicht (TiW/Pt) auf und benetzt diese schlagartig. Durch die Tropfenabkühlung entstehen halbkugelförmige Bumps, welche durch einen anschließenden Reflowprozess über das gesamte Bondpad aufgeschmolzen werden können. Dies ist in **Bild 7** dargestellt.

## 4 Diskussion und Ausblick

Der vorgestellte Dispenser zum kontaktfreien und hochparallelen Drucken von flüssigem Lot wurde erfolgreich getestet und charakterisiert. Die auswechselbare und wieder verwendbare Siliziumdüsenplatte ermöglicht ein schnelles Umrüsten auf verschiedenste Pad-Layouts, wobei die Kosten für die einzelnen mikrobearbeiteten Düsenplatten relativ gering bleiben. Somit kann mit geringem Aufwand schnell auf die Anforderungen der Elektronikindustrie reagiert werden.

Zukünftig werden weitere Experimente zur Optimierung der Düsengeometrien durchgeführt. Weiter soll das Dispensiermodul in eine komplette Flip-Chip-Station, die auf dem Prinzip des am HSG-IMIT patentierten temperaturgeregelten Laserlötens basiert, eingesetzt werden.



**Bild 7** oben links: REM-Aufnahme nach dem Bumping- und Sägeprozess

oben rechts: gleicher Chip vor dem Reflowprozess

unten links: linke Kontaktfläche des Chips

unten rechts: REM-Aufnahme nach dem Reflow

## 5 Danksagung

Dieses Projekt wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) gefördert (Nr. 172 ZN).

## 6 Literatur

- [1] W. Wehl et al.: "A drop-on-Demand Metal-Jet-Printer for Wafer Bumping", 14th European Microelectronics and Packaging Conference & Exhibition, 23-25 June 2003
- [2] B. de Heij et al. "A Tuneable and Highly-Parallel Picolitre-Dispenser Based on Direct Liquid Displacement", Sensors and Actuators A 103 (2003) 88-92
- [3] F. Irlinger, et al.: "Hochtemperatur-Tropfenerzeugung mittels eines elektromagnetischen Drop-on-Demand-Systems", Mikrosystemtechnik-Kongress 2005, 325-328