

Galvanische Fertigung von nano- und mikrostrukturierten Shim-Formeinsätzen

Guttman, M.; Jakobs, P.-J.; Kaiser, K.; Vannahme, C.; Zimmermann, L.; Schelb, M.; Matthis, B.; Straus, C.; Mappes, T.; Saile, V.

Kurzfassung

Eine Kombination aus lithographischen Prozessen und Nickelgalvanoformung wird genutzt, um nano- und mikrostrukturierten Formeinsätze für optische oder fluidische Anwendungen zu fertigen. Nachfolgend wird auf den Fertigungsprozess, die Möglichkeiten und Grenzen der Elektronenstrahl-Lithographie sowie auf die neue Anlagentechnik, die Parameter und die Besonderheiten bei den galvanischen Nickelprozessen eingegangen. Außerdem werden Anwendungsbeispiele vorgestellt, die mit den Formeinsätzen ermöglicht werden.

1 Einleitung

Galvanotechnische Prozesse kommen heute in unterschiedlichster Art und Weise bei der Fertigung von Bauteilen und Komponenten für die Mikroelektronik und die Mikrosystemtechnik zum Einsatz. Insbesondere Verfahren zur Beschichtung, zum Abtragen (elektrochemisches Ätzen) oder zum Polieren spielen dabei eine entscheidende Rolle. Hierbei werden die Verfahren sowohl zur Fertigung von großen Stückzahlen (z. B. Sensoren, Zahnräder) als auch zur Herstellung von Einzelbauteilen (z. B. Werkzeuge) genutzt [1, 2].

Eine Anwendung galvanischer Prozesse in diesem Kontext ist die Fertigung von strukturierten Shim-Formeinsätzen (Shims) die ihre Verwendung bei der Kunststoff-Replikation mittels Spritzgießen oder Heißprägen finden [3, 4]. Mit diesen werden nano- bzw. mikrostrukturierte Kunststoffbauteile in großen Stückzahlen hergestellt. Für die Fertigung der Shims (ähnlich der von Nickelstampfern für CDs bzw. DVDs [5]) wird zunächst durch ein strukturgebendes Verfahren in einem polymeren Resist

(Fotolack) bzw. in Silizium oder in Glas eine Masterstruktur erzeugt, diese mit einer Startschicht metallisiert und mittels Galvanoformung in ein Metall umkopiert.

2 Erzeugung der Masterstrukturen

2.1 Elektronenstrahl-Lithographie

Eine Methode zur Erzeugung von Strukturen im Mikrometer- bis unteren Nanometerbereich mit hoher Strukturdichte ist die Elektronenstrahl-Lithographie. Dabei rastert ein fokussierter Elektronenstrahl die Oberfläche des zu strukturierenden Substrats ab, das mit einem gegenüber Elektronen empfindlichen, Resist beschichtet ist. Der Resist wird dabei chemisch verändert, so dass anschließend in einem nasschemischen Entwicklungsschritt die bestrahlten Bereiche herausgelöst werden können [6].

Der am Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) vorhandene Elektronenstrahlschreiber VB6 (UHR-EWF) der Fa. Vistec wird mit einer Beschleunigungsspannung von 100 kV betrieben und hat bei einem Mainfield von 1310 x 1310 μm^2 eine Adressiergenauigkeit von 1,25 nm bei einer Tischpositioniergenauigkeit von < 1 nm. Als Substrate werden 4-Zoll-Siliziumwafer verwendet (6-Zoll-Substrate sind ebenfalls einsetzbar), die in Abhängigkeit von der Funktion der zu erzeugenden Strukturen einen unterschiedlichen Schichtaufbau besitzen. Die Siliziumoberfläche ist entweder thermisch oxidiert (ca. 1 μm SiO_2), Chrom bzw. Gold beschichtet (7 nm Cr / 15 nm Au), HMDS-funktionalisiert oder wird ohne Vorbehandlung verwendet. Der PMMA-Resist (Typ 950K, Fa. Allresist) wird durch Variation des Lösemittelgehalts in Dicken zwischen 25 nm und 3,2 μm mittels Aufschleudern (Spincoaten) aufgebracht und danach kurzzeitig bei 110 °C ausgebacken. Die Schreibzeiten der Strukturen sind layoutabhängig und können bis zu 50 h betragen. Die Entwicklung der Masterstrukturen erfolgt in einer an Schichtdicke und Strukturgeometrie angepassten Mischung aus Methylisobutylketon und Isopropanol im Sprühverfahren oder im Becherglas.

2.2 Strukturierung von Glassubstraten

Zur Herstellung von Shims mit diffraktiven optischen Elementen (DOEs) werden 4-Zoll-Glaswafer verwendet, die an der Universität Straßburg strukturiert werden. Zur Herstellung der Masterstrukturen erfolgt zuerst eine Beschichtung der Glaswafer mit Chrom, dann eine Belackung mit AZ-Resist, der über eine Maske mit UV-Licht belichtet wird. Die belichteten Bereiche werden danach in einem Entwickler entfernt. Durch reaktives Ionenätzen (RIE) werden diese Strukturen in das Substrat eingätzt. Abschließend werden Resist und Chromschicht nasschemisch entfernt.

Durch eine Wiederholung dieser Schritte kann die Anzahl der Stufen des Ätzprofils erhöht werden. Dadurch kann eine gewisse Annäherung an ein kontinuierliches Ätzprofil (optimal, aber technisch nicht mit vertretbarem Aufwand zu realisieren) erreicht werden. Je mehr Stufen das Ätzprofil aufweist, desto höher ist die Beugungseffizienz, wodurch das Streulicht reduziert wird.

3 Galvanische Shim-Fertigung

3.1 Metallisierung der Masterstrukturen

Der bei der Elektronenstrahl-Lithographie verwendete Resist ist elektrisch isolierend, so dass für einen vollflächigen Galvanikstart auf die Masterstrukturen zunächst mittels PVD-Verfahren eine geschlossene, haftfeste, leitfähige Metallschicht aufgebracht werden muss. Hier hat sich die Kombination aus einer dünnen Chromschicht (als Haftvermittler) und einer gut leitfähigen Goldschicht bewährt. Als Standardschichtdicken werden 10 nm Cr und 50 nm Au verwendet. Bei Strukturhöhen kleiner 50 nm ist es zur Vermeidung einer Einebnung der Strukturen (zum Erhalt der Strukturmaßhaltigkeit) notwendig, mit noch dünneren Metallisierungsschichten zu arbeiten. Hier wird eine Schichtfolge von 7 nm Cr und 25 nm Au eingesetzt.

Bei den strukturierten Glaswafern wird vollflächig eine 80 nm hohe Titanschicht aufgedampft. Aufgrund der schlechten Haftung von galvanisch abgeschiedenem Nickel auf Titan dient diese Schicht später als Trennschicht, die das Ablösen des Shims vom Wafer ermöglicht. Darauf wird am äußeren Umfang der Substrate zusätzlich

eine 6,5 mm breite und 300 nm hohe Goldschicht aufgebracht, um eine zuverlässige Kontaktierung des Substrats bei der Nickelabscheidung zu ermöglichen.

3.2 Galvanoformung

Die Galvanoformung erfolgt in einem borsäurehaltigen, chloridfreien Nickelsulfamat-elektrolyten bei einer Temperatur von 52 °C und einem pH-Wert von 3,4 bis 3,6 [7]. Die Stromdichte zu Beginn der Abscheidung liegt bei 0,1 bzw. 0,25 A/dm², um einen gleichmäßigen Start der galvanischen Abscheidung über die gesamte Abscheidefläche und ein langsames, vollständiges und defektfreies Befüllen der Strukturen zu erreichen. Eine niedrige Stromdichte ist für den Galvanikstart unerlässlich, da es sonst wegen der hohen Kontaktwiderstände zum „Durchbrennen“ an den Kontaktstellen der dünnen Metallisierungsschicht kommt. Schrittweise wird die Stromdichte während der Abscheidung bis 1,0 A/dm² erhöht und die Abscheidung beendet, wenn eine Schichthöhe von 500 µm erreicht ist (nach ~ 48 h). Die geringen Stromdichten führen auch zu einer geringen Durchbiegung der Substrate aufgrund geringer innerer Spannungen der Nickelschicht und zu einer sehr homogenen Schichtdicke. Diese kann weiter verbessert werden, wenn die Halterungen mit entsprechenden Blenden ausgestattet werden.

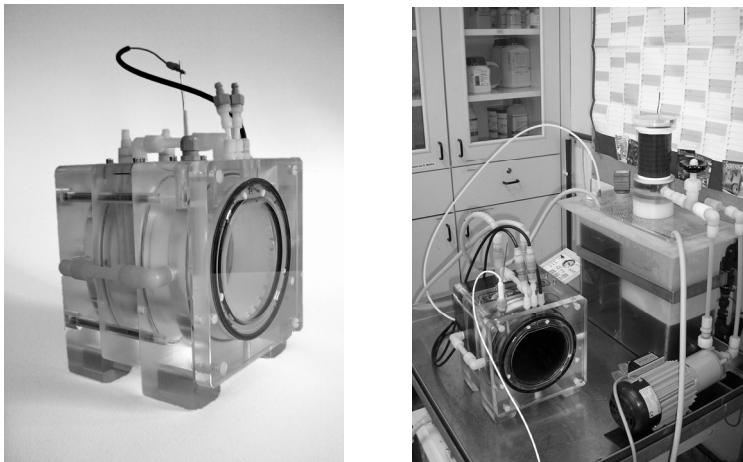


Abb. 1: Silicet process unit für 6-Zoll-Wafersubstrate

Die Aufnahme und Kontaktierung der Wafer bei den Standard-Galvanikanlagen der Fa. Hega (Volumen 40 l) erfolgt über Vakuumhalterungen der Fa. silicet AG. Dieses Halteprinzip kommt auch bei einer Neuentwicklung zum Einsatz, bei der sich um

einen neuartigen, modular aufgebauten Anlagentyp handelt [8]. Diese *silicet process unit* wurde am IMT für die Mikrogalvanoformung von Nickel auf 4- und 6-Zoll-Substraten erprobt und wird jetzt für die Shim-Fertigung eingesetzt (Abb.1).

Die *silicet process-unit* besteht aus dem Strömungs-, dem Prozess- und dem Substratmodul, einem Deckel sowie einer externen Peripherie (Elektrolytbehälter, Pumpen, Filter) und ist durch Einsatz von Adaptern für Substratgrößen zwischen 2- und 8-Zoll nutzbar. Die geringe Randfläche auf den Substraten, welche zum Halten und Abdichten benötigt wird, erhöht den Anteil der aktiv nutzbaren Fläche. Durch die Abmessungen innerhalb der *process-unit* werden nur kleine Mengen des jeweiligen Prozessmediums benötigt (z.B. Ätzlösungen oder galvanische Elektrolyte). Die notwendige Temperierung ist daher mit einem geringeren Energieeinsatz möglich.

Durch das geringe Prozessvolumen (ca. 3 l) innerhalb der *process-unit* können die Parameter wie z. B. Temperatur, Strömungsverlauf des Mediums und Strömungsgeschwindigkeit in Substrat- bzw. Wafernähe besser und reproduzierbarer eingestellt werden. Dies ermöglicht eine höhere Genauigkeit z. B. in der Homogenität der galvanisch abgeschiedenen Schichtdicken und/oder auch in der Homogenität der abgetragenen Schichten beim Ätzen von hochpräzisen Siliziumstrukturen. In der *process-unit* findet der gesamte Prozess im geschützten Raum statt. Das führt zu:

- deutlicher Kostenersparnis (da der Medienverbrauch durch die Größe des Prozessmoduls gering ist und nur kleine Medienmengen zu temperieren sind),
- erhöhter Sicherheit (da der direkte Kontakt mit giftigen und aggressiven Medien vermieden wird und es keine Ausgasung an offenen Oberflächen gibt),
- hoher Mobilität und Flexibilität (die durch den modularen Aufbau, den geringen Platzbedarf, den Einsatz im Batchverfahren, sowie dem problemlosen Transport der gesamten, nicht standortgebundenen Einheit gewährleistet ist),
- erhöhter Qualitätssicherung (da durch das Single-Wafer-Processing jedes Substrat bei gleicher Prozessführung einzeln gesteuert und qualifiziert wird).

Die *process-unit* stellt damit eine Alternative, insbesondere bei der Shim-Fertigung, gegenüber relativ starren Großanlagen vor allem bei größeren Stückzahlen dar.

3.3 Trennung vom Substrat

Siliziumsubstrate: Nach der Galvanoformung wird der Wafer in einer 30 Gew.-% KOH-Lösung bei 80°C aufgelöst. Wird ein oxidiertes oder beschichtetes Siliziumwafer

als Substrat für die Elektronenstrahl-Lithographie verwendet, muss die SiO_x - bzw. Ti/TiO_x -Schicht anschließend mit verdünnter HF-Lösung entfernt werden. Die auf dem Shim jetzt noch verbliebene Resistschicht wird in Aceton bzw. Ethylacetat gestrippt, bei einigen Strukturtypen mit hohem Aspektverhältnis ist hier eine Unterstützung mittels Ultraschall erforderlich. Die auf dem Resist aufgedampften Galvanikstartschicht aus Cr/Au bleibt auf der Shim-Oberfläche erhalten und wird nur bei wenigen Ausnahmen mittels nasschemischen Ätzen entfernt.

Glassubstrate: Nach Ende der galvanischen Abscheidung wird der Wafer mechanisch von der Nickelschicht getrennt oder der Verbund von Substrat und Nickelschicht auf ca. 90°C erwärmt, um eine Lockerung der Verbindung durch Ausnutzung der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten zu erreichen. Dabei wirkt die Metallisierungsschicht aus Titan als Trennschicht, die Haftung der Nickelschicht ist hier nur so gering als notwendig, und verbleibt auf dem Substrat.

Die jetzt für das Heißprägen einsetzbaren Nickel-Shims haben folgende Eigenschaften: Durchmesser 88 bzw. 138 mm, Dicke $\sim 500\ \mu\text{m}$, Härte $\sim 300\ \text{HV}_0,1$.

4 Anwendung der Shim-Formeinsätze

4.1 Organische Halbleiterlaser und Wellenleiter in PMMA

Photonische Lab-on-Chip-Systeme sind viel versprechend für biomedizinische und chemische Vor-Ort-Analysen, denn eine optische Detektion erlaubt hohe Empfindlichkeiten und eine verkürzte Reaktionszeit. Für die Integration von organischen DFB (englisch: distributed feedback) Halbleiterlasern und UV-induzierten Wellenleitern ist Polymethylmethacrylat (PMMA) sehr gut geeignet. Wird zusätzlich zu den photonischen Komponenten ein Mikrofluidikkanal integriert, ist in diesem eine Analyse auf einem Polymerchip möglich. Das Heißprägen von 100 nm breiten und 60 nm hohen DFB Gitterlinien in einer Vertiefung ($1,7\ \mu\text{m}$) resultiert in einer optimierten Kopplung zwischen Laser und Wellenleiter. Dies wurde in [9] vorgeschlagen und in [10] demonstriert. Das Versenken des Lasers erlaubt nicht nur eine verbesserte Kopplung sondern auch eine einfache Verkapselung des Lasers. Verwendet wurde ein Nickel-Prägwerkzeug, das in Abb. 2 gezeigt ist.

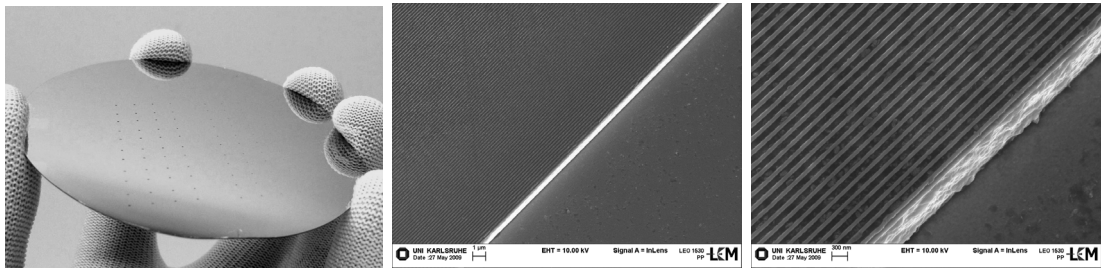


Abb. 2: Shim-Formeinsatz (links) und Strukturdetails für organische Halbleiterlaser

4.2 Superhydrophobe Mikrofluidiksysteme

Mikrofluidiksysteme können für innovative biomedizinische Anwendungen, wie die Verkapselung von einzelnen Zellen, eingesetzt werden. Dabei sind tröpfchenbasierte mikrofluidische Systeme in der Lage, biologische Prozesse, die in kleinen Tröpfchen ablaufen, präzise nach Ort und Reaktionszeit aufzulösen. Die aktuelle Herausforderung liegt in der kostengünstigen Fertigung mikrofluidischer Systeme, die in der Lage sind, Tröpfchen mit konstant hohen Raten und konstantem Volumen zu generieren. Ein Lösungsansatz ist, mikrofluidische Systeme mit superhydrophoben Kanalwänden, die einen periodischen Tröpfchenabbruch gewährleisten, herzustellen. Diese Annahme wurde durch Simulationsergebnisse bestätigt. Im Rahmen einer Dissertation wurde ein neuer Ansatz, mikrofluidische Systeme mit runden Kanälen und superhydrophoben Eigenschaften zu fertigen, erarbeitet [11]. Dieser beruht auf der Kombination aus Heißprägen und Mikrothermoformen unter Einsatz nanostrukturierter Shim-Formeinsätze (Abb. 3) [12]. Tröpfchengenerierungsversuche ergaben, dass ein periodischer Tröpfchenabbruch mit konstantem Volumen in den superhydrophoben Systemen erreicht wird, wohingegen ein unperiodischer Abbruch mit nicht konstantem Volumen in dem unmodifizierten System beobachtet wurde.

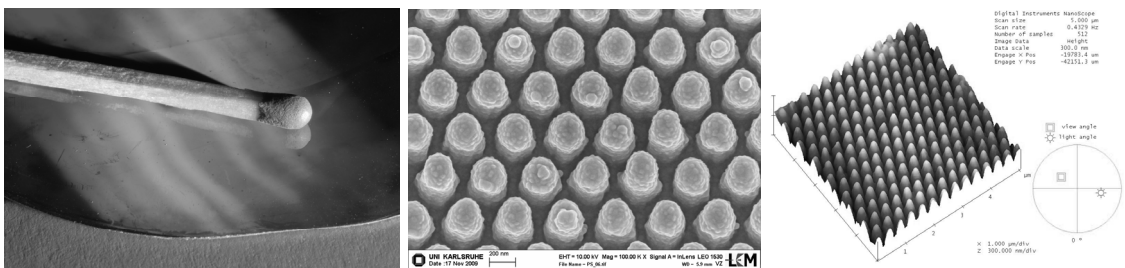


Abb. 3: Shimformeinsatz (links) und Strukturdetails für ein superhydrophobes Mikrofluidiksystem

4.3 Diffraktive optische Elemente

Diffraktive optische Elemente (DOE) bestehen aus Mikrostrukturen, die sich in und auf transparenten Materialien befinden. Durch die gezielte Ausnutzung der Beugung an den Strukturen lassen sich Lichtstrahlen kontrolliert manipulieren. Das Anwendungsspektrum reicht hierbei vom Einsatz als einfacher Strahlteiler für Laser bis hin zur Erzeugung von komplexen Mustern oder Verbesserung der Abbildungsgenauigkeit von konventionellen Optiken. Aufbauten mit komplexen Linsensystemen, Prismen und Strahlteilerwürfeln können durch den Einsatz von DOE einfacher und kompakter realisiert werden. Ein Beispiel für den industriellen Einsatz von DOE ist die Aufspaltung von Laserstrahlen, für die Herstellung von periodisch angeordneten Löchern (Siebe, perforierte Folien) oder aber die gezielte Formänderung eines Laserstrahls für Zwecke, bei denen das ursprüngliche Strahlungsprofil des Lasers unerwünscht ist (z.B. bei der Laserbearbeitung von Werkstücken) (Abb. 4).

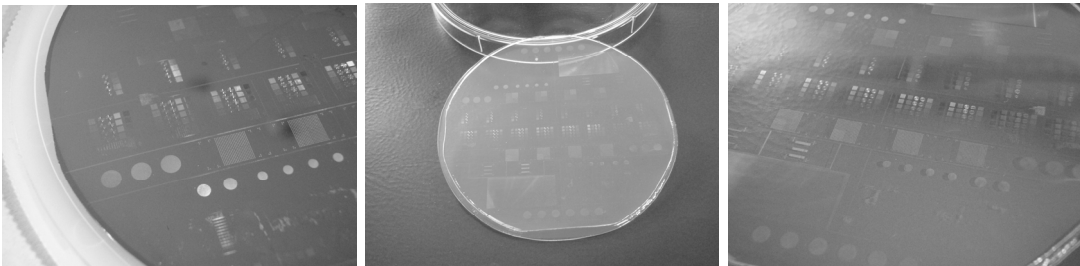


Abb. 4: Shim-Formeinsatz (links) und Abformteile (mitte & rechts) mit DOE

Literatur

- [1] Lee, C.H.; Jiang, K.: *Fabrication of thick electroforming micro mould using a KMPR negative tone photoresist*, *J. Micromech. Microeng.*, 18, 2008, 055032
- [2] Horiuchi, T.; Furuuchi, Y.; Nakamura, R.; Hirota, K.: *Micro-gear fabrication using optical projection lithography on copper-clad plastic substrates and electroplating of nickel*, *Microelectron. Eng.*, 83, 2006, pp. 1316-1320
- [3] Piotter, V.; Bauer, W.; Hanemann, T.; Hecke, M.: *Replication technologies for HARM devices: status and perspectives*, *Microsyst. Technol.*, 14, 2008, pp. 1599-1605

-
- [4] Worgull, M.: *Hot embossing: theory and technology of microreplication*, Oxford, William Andrew, 2009, ISBN 978-0-8155-1579-1
- [5] Bifano, T.G., Fawcett, H.E.; Bierden, P.A.: *Precision manufacture of optical disc master stampers*, *Precision Eng.*, 20, 1997, pp. 53-62
- [6] Klein, M.F.G.; Hein, H.; Jakobs, P.J.; Linden, S.; Meinzer, N.; Wegener, M.; Saile, V.; Kohl, M.: *Electron beam lithography of V-shaped silver nanoantennas*, *Microelectron. Eng.*, 86, 2009, pp.1078-1080
- [7] Schanz, G.; Bade, K.: *Microelectroforming of metal*,. In: *Advanced Micro and Nanosystems*, Vol. 4, *Microengineering of Metals and Ceramics*, ed. by Baltes, H. et al: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2005, pp. 395-420
- [8] Guttman, M.; Kaiser, K.; Muth, S.; Moritz, H.; Schmidt, R.; Zwanzig, M.; Hofmann, L.; Schubert, I.: *Neues modulares Anlagenkonzept für nasschemische Ätzprozesse und die Wafergalvanoformung*, *Galvanotechnik*, 100, 2009, pp. 2616-2624
- [9] Mappes, T.; Vannahme, C.; Schelb, M.; Lemmer, U.; Mohr, J.: *Design for optimized coupling of organic semiconductor laser light into polymer waveguides for highly integrated bio-photonic sensors*, *Microelectron. Eng.* 86, 2009, pp. 1499-1501
- [10] Vannahme, C.; Klinkhammer, S.; Kolew, A.; Jakobs, P.-J.; Guttman, M.; Dehm, S.; Lemmer, U.; Mappes, T.: *Integration of organic semiconductor lasers and single-mode passive waveguides into a PMMA substrate*, *Microelectron. Eng.* 87, 2010, pp. 693-695
- [11] Zimmermann, L.: *Dreidimensionale nanostrukturierte und superhydrophobe mikrofluidische Systeme zur Tröpfchengenerierung und -handhabung*, *Dissertation*, *Karlsruher Institut für Technologie*, 2010
- [12] Zimmermann, L.; Guttman, M.; Guber, A.; Saile, V.: *A novel fabrication method to integrate super hydrophobic nanostructures into microfluidic systems*, *Proc. 2nd Int. Symp. on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies*, Nov. 24-27, 2009, Bratislava, Slovak Republic; ISBN 978-80-227-3216-1