

Nano-3D-Druck zur Sensorentwicklung

Rebhan, Matthias E.

Hochschule München

<https://doi.org/10.57688/364>

Kurzfassung

Die Miniaturisierung von Mikrosensoren stellt immer größere Anforderungen an die Fertigungsprozesse. Parallel dazu wächst der Bedarf an hochgenauen Bauteilen, die individuell auf einzelne Systeme abgestimmt sind. Gerade die Herstellung dreidimensionaler Mikrosysteme & MEMS ist aufwendig und kompliziert. Der nano-3D-Druck (2-Photonenpolymerisationsprozess) ist eine junge Technologie mit großem Potential in diesem Bereich. Mit ihm lassen sich dreidimensionale Strukturen deutlich kleiner als 1 μm und Oberflächenrauigkeiten unter 100 nm realisieren.

Im Folgenden werden die Technologie und der Prozess des nano-3D-Drucks erläutert. Anschließend werden Anwendungsbeispiele aus dem Bereich der Optik, der Biotechnologie und der Sensorik vorgestellt.

1. Nano-3D-Druck

1.1. Einführung

Mit dem nano-3D-Druck können Strukturen im Mikrometer- und auch im Sub-Mikrometerbereich hergestellt werden. Dazu werden zunächst die gewünschten Objekte mit Standard-CAD-Software entworfen, dann im STL-Format exportiert und anschließend in die nano-Lithographie-Anlage eingespielt. Ein Laser „schreibt“ diese dann in einen fotoempfindlichen Lack. Dabei fährt der Laser linienweise die Struktur nach. Im Fokuspunkt des Lasers wird eine fotochemische Reaktion durch einen sogenannten Zwei-Photonen-Prozess initialisiert, der zur Polymerisation des flüssigen Fotolacks führt.

Daher wird dieser Prozess auch als 3D nano (photo) lithography oder als 2 photon polymerization (2PP) bezeichnet.

Entscheidend für die minimale Auflösung ist der verwendete Fotolack, die Laserleistung und die Schreibgeschwindigkeit. Unter günstigen Bedingungen liegt die laterale Auflösung unter 200 nm.

1.2. Technologie

Für die 2-Photonenpolymerisation wird das Laserlithographiesystem Photonic Professional der Firma nanoscribe verwendet. Es basiert auf einem Femtosecond Fiberlaser (Pulsweite < 120 fs, Wiederholrate 80 MHz) mit einer Wellenlänge von 780 nm. Damit

können Felder bis zu einer Größe von 10 x 10 cm beschrieben werden. Im Piezoscanner-Modus liegt die Positioniergenauigkeit bei 5 nm und damit weit unter der typischen Linienbreite von 200 nm.

1.3. Materialien

Für die 2-Photonenpolymerisation können Standardfotolacke oder Permanentresiste wie SU8 verwendet werden, die bei 390 nm also der halben Wellenlänge des Lasers absorbieren. In den hier beschriebenen Studien wird der Resist IP-Dip von nanoscribe benutzt. Als Entwickler dient EBR-Solvent (PGMEA) und zum Spülen Isopropanol.

2. Anwendungen

2.1. Dehnungsmessstreifen auf gewölbten Oberflächen

Dehnungsmessstreifen (DMS) werden in vielen technischen Anwendungen beispielsweise Längen-, Biege- oder Druckmessung eingesetzt. Dazu wird der metallische oder halbleitende DMS, der in einer Kunststoffolie eingebettet ist, auf den (meist metallischen) Untergrund geklebt. Dies führt oftmals zu Haftungsproblemen. Zudem lassen sich DMS schwierig auf gekrümmte Oberflächen applizieren. Die genannten Probleme lassen sich beim Einsatz des nano-3D-Drucks vermeiden [1].

2.1.1. Herstellungsprozess

Zunächst wird die elektropolierte Stahloberfläche (Rauheit 640 nm) mit der Standard-Halbleitertechnik SpinCoating & Baking mit SU8 beschichtet. Die neue Oberfläche hat dann mit 50 nm eine deutlich geringere Rauheit. Gleichzeitig wird damit eine Isolationsschicht zwischen den späteren metallischen DMS und dem elektrisch leitenden Stahl erzeugt. Anschließend wird Kupfer 100 bis 500 nm dick auf das SU8 gesputtert. Nach dem folgenden nano-3D-Druck und der Entwicklung des Fotolacks wird das nun frei liegende Kupfer geätzt (Feinätzkristalle Typ Seno 3207). Der Fotolack wird schließlich mit Lösungsmitteln entfernt.

2.1.2. Ergebnisse

In Abbildung 1 sind strukturierte Kupferbahnen erkennbar. Die für die DMS nötigen typischerweise 50 bis 100 µm breiten Bahnen können realisiert werden. Die Haftung des Fotolacks auf dem Kupfer kann verbessert und die daraus folgende Unterätzung durch einen Postbake (150°C für 5 min) deutlich reduziert werden.

Der nano-3D-Drucker verfügt über ein optisches Verfahren, mit dem er die Oberfläche des Substrats findet, von der aus der Schreibprozess gestartet werden soll. Dieses ist für Glassubstrate optimiert. Auf der Kupferoberfläche funktioniert dieser optische Algorithmus nicht; vielmehr ist eine manuelle Suche nach dem Startpunkt des nano-3D-

Drucks notwendig. Dadurch sind höhere Toleranzen bei der Lackdicke (mind. 2 μm) und damit auch bei den Schreibzeiten notwendig.

2.1.3. Ausblick

Die Haftung des Lackes ließe sich durch Haftvermittler verbessern. Alternativ können auch andere Fotolacke eingesetzt werden. Zudem kann der optische Suchalgorithmus auf die Kupferoberfläche angepasst werden, was den Gesamtprozess beschleunigen würden, unter anderem dadurch, dass dann auch die Lackdicke reduziert werden könnte.

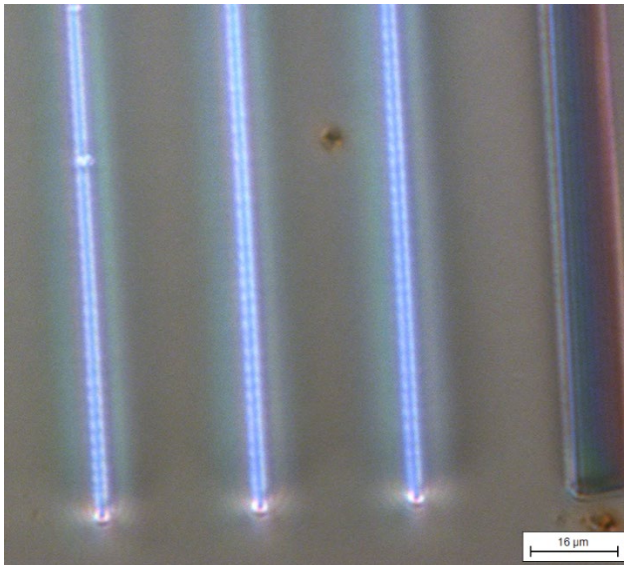


Abb. 1: Mikroskop-Aufnahmen von Kupfer-Bahnen (blau) eines DMS auf Stahl mit SU8-Coating [1].

2.2. Käfig für lebendige Zellen

Zellen sind typischerweise wenige Mikrometer klein. Wenn das Verhalten einzelner Zellen untersucht werden soll, ist es wünschenswert, diese lokalisieren und damit identifizieren zu können. In der Regel ist dies jedoch schwierig, da sich die Zellen weder markieren noch an einem Ort fixieren lassen. Die zweite Einschränkung kann überwunden werden: In einem 3D-gedruckten Fluidkanal wird mit nano-3D-Druck ein Käfig gesetzt [2].

2.2.1. Herstellungsprozess

Mittels Stereolithografie wird ein Plättchen mit einem 300 bis 500 μm breiten und ca. 100 μm tiefen Fluidkanal 3D-gedruckt. Aufgrund der daraus resultierenden Rauigkeit des Kanals von 2,8 μm bis 4,0 μm ist die automatische Erkennung der Oberfläche durch den nano-3D-Drucker nicht möglich; vielmehr muss der Startpunkt des nano-3D-Drucks manuell eingestellt werden (siehe auch 2.1).

Auf dieser rauen Oberfläche wird dann der Käfig nano-3D-gedruckt. Dazu wird zuerst ein „Fundament“ erzeugt, um die Verankerung und die Anbindung an die 3D-gedruckte Oberfläche herzustellen und gleichzeitig einen planen Untergrund zu erhalten. Darauf wird dann die ca. 50 µm breite und 70 µm hohe Käfigstruktur erstellt.

2.2.2. Ergebnisse

In Abbildung 2 sind zwei Käfige nebeneinander im Fluidkanal eingebettet. Der Einlass hat eine Breite von ca. 30 µm, während der Auslass ca. 10 µm schmal ist, um die verwendeten Zellen, die ca. 20 µm groß sind, einfangen zu können.

Basierend auf diesen Ergebnissen entwickelte eine Nachbargruppe an der Hochschule München einen proteinbasierten Fotolack. Mit den damit hergestellten Gerüsten konnten diese mit Myoblast-Zellen von Mäusen bzw. mit menschlichen Lungen-Fibroblast besiedelt werden [3].

2.2.3. Ausblick

Mit dieser Studie konnte gezeigt werden, dass Käfige für lebendige Zellen in einen Fluidkanal integriert werden können. Derzeit laufen Entwicklungen für einen neuen biokompatiblen Fotoresist.

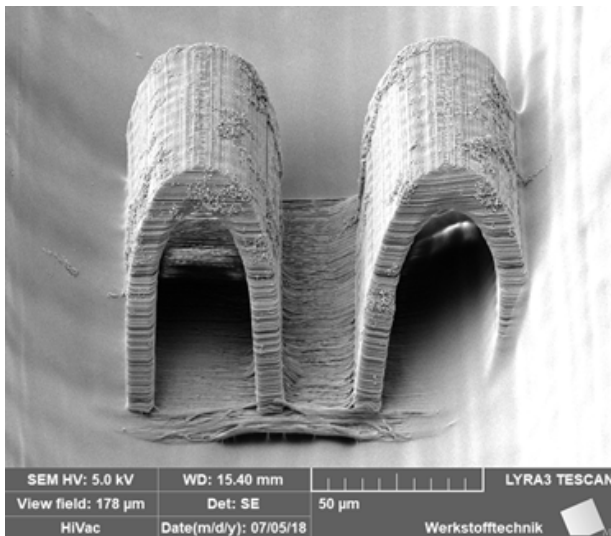


Abb. 2: REM-Aufnahme zweier nano-3D-gedruckter Käfige für lebendige Zellen innerhalb eines Fluidkanals [2].

2.3. Optisch glatte Oberflächen für die Mikroskopie

Mikroskopie jenseits der Abbe'schen Auflösungsbegrenzung erfordert neuartige optische Elemente wie z.B. Phasenplättchen. Diese können aufgrund ihrer ungewöhnlichen Geometrie nicht mit den Technologien und Prozessen für Standard optische Elemente wie Linsen und Spiegel hergestellt werden. Nano-3D-Druck kann diese Einschränkungen überwinden. Zudem muss die Oberfläche optisch glatt sein, d.h. ihre

Rauigkeit muss unter einem Zehntel der Wellenlänge des verwendeten Lichts liegen [4].

2.3.1. Herstellungsprozess

Das Phasenplättchen soll als Vortex mit einem Durchmesser von 50 μm und einem Höhenunterschied von 1,0 μm realisiert werden. Die Laserleistung wird knapp über den Schwellenwert eingestellt, der zur Photopolymerisation notwendig ist. Als Schichtabstand wird 10 nm gewählt.

2.3.2. Ergebnisse

In Abbildung 3 ist eine AFM-Messung einer Vortex dargestellt. Die Rauigkeit liegt mit 60 nm unterhalb den geforderten 10 % der Wellenlänge des zur Mikroskopie verwendeten Lichts. Entscheidend bei diesem Prozess ist die Kombination aus z-Vorschub von einer Schreibebeine zur nächsten, der Laserleistung und der Schreibgeschwindigkeit. Diese sogenannte Slicing Distance ist der entscheidende Parameter für die Rauigkeit der Oberfläche. Bei zu hoher Laserleistung und gleichzeitig zu geringen Schreibgeschwindigkeit degeneriert der Fotolack lokal, was zu punktförmigen Defekten in der Vortex führt und damit zu unerwünschten Streuung des Lichts bei der Mikroskopie.

Diese erfolgreichen Experimente wurden 2018 mit dem Applied Photonics Award ausgezeichnet [5].

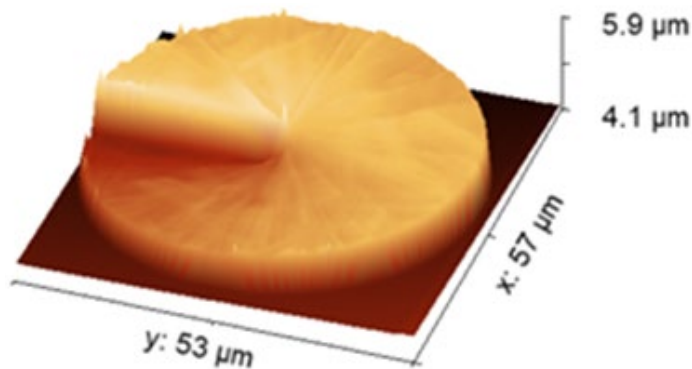


Abb. 3: AFM-Aufnahme einer Vortex [4]

2.3.3. Ausblick

Für den Einsatz im Mikroskop muss der Durchmesser der Vortex größer sein als der Durchmesser des Laserstrahls also mindestens 0,5 mm. Dies würde die Herstellungsdauer etwa um den Faktor 100 verlängern, was durch eine Optimierung der Schreibprozess-Technologie realisierbar scheint.

3. Zusammenfassung

Der nano-3D-Druck ist eine technologische Weiterentwicklung im Bereich Mikrosysteme & MEMS. Dadurch eröffnen sich neue Möglichkeiten unter anderem für die Herstellung von Sensoren und optischen Bauelementen. Für die detaillierte Beschreibung der Technologie und weiter Beispiele bzw. Anwendungen sei auf [6-8] verwiesen.

Literatur

- [1] Kranz, T.: Prozessentwicklung für einen nano-strukturierten Dehnungsmessstreifensensor. Bachelorarbeit, Hochschule München, 2016.
- [2] Hagl, M.: Etablierung von Nano-3D-Druck auf stereolithografisch gedruckten Oberflächen. Bachelorarbeit, Hochschule München, 2018.
- [3] Erben, A.; Hörning, M. et al.: Adv. Healthcare Mater. 2020, 2000918, DOI: 10.1002/adhm.202000918.
- [4] Widl, A.: Herstellung einer vergrößerten Vortex mit Hilfe der Zwei-Photonen-Polymerisation. Bachelorarbeit, Hochschule München, 2018.
- [5] www.applied-photonics-award.de/de/Preistraeger.html
- [6] Eschenbaum, C.: Zwei-Photonen-Lithografie zur Herstellung optofluidischer Systeme. Dissertation, Karlsruhe, 2016, URL <http://d-nb.info/1116427656/34>.
- [7] Obata, K.; El-Tamer, A. et al.: High-aspect 3D two-photon polymerization structuring with widened objective working range (WOW-2PP). Light: Science & Applications 2, 2013, Nr. 12, e116, URL <https://www.nature.com/articles/lisa201372>.
- [8] Thiel, M.: Design Fabrication and Characterisation of 3D chiral Photonic Crystals. Dissertation, Karlsruhe, 2010, <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000015775>.

Kontakt

Prof. Dr. Matthias E. Rebhan
Hochschule München
Fakultät für Wirtschaftsingenieurwesen
Lothstr. 64
80335 München
E-Mail: matthias.rebhan@hm.edu