

Photolithografische Masterherstellung mittels Inkjet-Maske für einen NIL Prozess

S. Burkert* C. Eder* und A. Heinrich*

*Zentrum für optische Technologien, Hochschule Aalen, Anton-Huber-Straße 21, 73430 Aalen

<mailto:selina.burkert@hs-aalen.de>

Es wird ein individuelles Fotolithographiesystem vorgestellt, welches die Abbildung der Druckpunktrauheit entlang Strukturkanten einer Inkjet-Photomaske verhindert. Hierfür wird absichtlich die Auflösung des Lithographiesystems beschränkt. Durch die Verwendung eines nichtlinearen Polymers, können scharfe Kanten entwickelt werden während die Druckpunktrauheit der Inkjet-gedruckten Maske nicht übertragen wird.

1 Einführung

Als schnelle und präzise Fertigungsmethode von optischen Strukturen im Mikro- und Nanometerbereich bietet sich die Nanoimprint Lithografie (NIL) an. Mit dieser können Masterstrukturen mittels eines Arbeitsstempels sehr präzise und in kürzester Zeit repliziert werden [1–3]. Üblicherweise werden die Masterstrukturen in dieser Größe mittels Focused Ion Beam (FIB)-Lithography, Electron Beam Lithography (EBL) oder Photolithography in ein Silizium (Si)-Substrat geschrieben [4]. Diese Verfahren haben einen entscheidenden Nachteil. Ihre Schreibgeschwindigkeit sowie ihre Prozesszeiten und die damit verbundenen Kosten sind hoch.

Um schnell und präzise Masterstrukturen im einstelligen Mikrometerbereich für die Replikation mit NIL ermöglichen zu können, wird hier eine inkjet-gedruckte Photomaske im photolithographischen Masterherstellungsprozess untersucht. Eine gedruckte Photomaske hat jedoch einen entscheidenden Nachteil. An den gedruckten Strukturkanten existiert eine relativ hohe Kantenrauheit aufgrund der einzelnen Druckpunkte des Inkjet-Verfahrens. Diese Rauheit wird bei der Belichtung durch eine Verkleinerungsoptik in die Masterstruktur übertragen. In diesem Proceeding wird ein Photolithographiesystem zur Abbildung von Inkjet-gedruckten Masken diskutiert, welches diesen Nachteil eliminiert. Dabei wird durch eine bewusste Reduktion der Auflösung der abgebildeten Maskenstruktur und unter der Verwendung eines nichtlinearen Photoresists die Abbildung der Kantenrauheit verhindert und eine verbesserte Kantengeometrien ermöglicht.

2 Inkjet-gedruckte Fotomaske

Die Inkjet-gedruckte Fotomaske gibt die NIL Masterstruktur vor. Sie wird mit einem Drucker (DMP 2850, Dimatix) auf eine hochauflösende Folie gedruckt. Die kleinste Struktur hat eine Strukturbreite von $18.1 \pm 2.0 \mu\text{m}$. Die Druckkantenrauheit von $12 \mu\text{m}$ entspricht einer Raumfrequenz von $83,3 \text{ lp/mm}$. Demnach muss die Auflösung des Lithographiesystems unterhalb von $83,3 \text{ lp/mm}$ sein, um die Abbildung der Druckpunktrauheit zu verhindern.

3 Individuelles Lithographiesystem

Das individuelle Lithographiesystem ist in Abbildung 1 dargestellt. Es besteht aus einer Beleuchtungseinheit, einer Unschärfe- und Vorverkleinerungseinheit und der Hauptverkleinerungseinheit. Die Abbildung in den relevanten Bildebenen und die zugehörige Intensitätsverteilung ist in Abbildung 1 auf der rechten Seite veranschaulicht. Die Auflösung und die Vergrößerung der Teilsysteme sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Beleuchtungseinheit (Kepler-Teleskop)

Das Licht der LED wird durch die beiden Kepler-Linsen aufgeweitet und in die Feldblende des Makro-Objektives fokussiert, um Vignettierung zu vermeiden und gleichzeitig den Spotdurchmesser in der Substratebene zu maximieren.

Unschärfe- und Vorverkleinerungseinheit (Makro-Objektiv)

Durch das Makro-Objektiv wird die Auflösung der Abbildung der Fotomaske in der Zwischenbildebene absichtlich reduziert, so dass die maximal übertragene Raumfrequenz unterhalb der Raumfrequenz der Druckpunktrauheit von $83,3 \text{ lp/mm}$ liegt. Dadurch werden Druckpunkte entlang der Strukturkante nicht durch das System abgebildet.

Hauptverkleinerung (Mikroskop-Objektiv)

Das Mikroskop-Objektiv bildet das Zwischenbild hochaufgelöst und verkleinert in der Substratebene ab.

Nicht-linearer Fotolack

Der nichtlineare Fotolack wird beim Überschreiten einer Energieschwelle entwickelt und bewirkt eine Kontrasterhöhung der belichteten Abbildung. Aufgrund dieser Kontrasterhöhung verbessert sich die Auflösung des Fotolithographiesystems von 29 lp/mm um 5% auf $30,6 \text{ lp/mm}$ im Fotolack. Zudem bewirkt die Kontrasterhöhung, dass trotz einer verschwommenen Abbildung steile Kanten entwickelt werden.

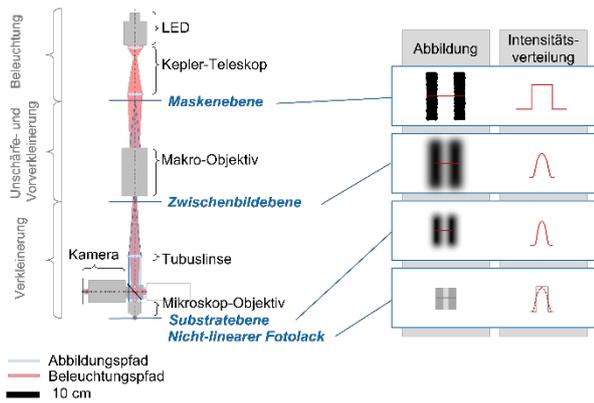


Abbildung 1: Das individuelle Lithografiesystem verhindert die Abbildung von Druckpunkten der Inkjet-Fotomaske im Master-Fotolack [5].

Tabelle 1: Auflösung und Vergrößerungsfaktoren des Fotolithografiesystems und dessen Teilsysteme.

Systemebene	Auflösung [lp/mm]	Vergrößerungsreferenzen	Vergrößerung
Kamerasensor	> 228	Substratebene - Kamerasensor	6.1
Zwischenbildebene	55.2	Maske - Zwischenbildebene	0.5
Substratebene	29	Maske - Substratebene	0.03
Im Fotolack	30.6	Maske - Polymer	0.03

4 NIL Masterherstellung

Für die Herstellung eines Polymermasters wurde ein positiver Fotolack (ma P 1240, MicroResist) verwendet. Bei einer Fotolackdicke von $4.1 \mu\text{m}$ konnte eine minimalen Strukturbreite von $2,1 \pm 0,1$ entwickelt werden. Demnach ist das maximale Apektverhältnis 0,51.

Die totale Systemvergrößerung (Fotolithografiesystem + Fotolack) ist bei Masterstrukturen unter $110 \mu\text{m}$ von der Kontrasterhöhung des Fotolacks beeinflusst (siehe Abbildung 3). Die Systemvergrößerung in Abhängigkeit zur Strukturgröße w kann mit einer Funktion m approximiert und im Maskendesign des NIL Masters berücksichtigt werden.

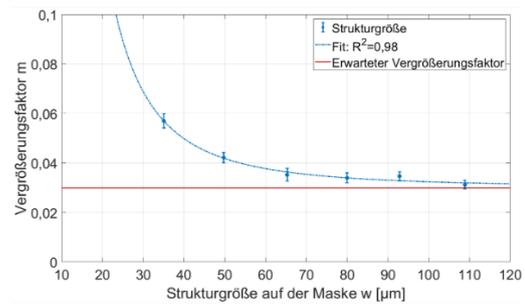


Abbildung 2: Der Vergrößerungsfaktor m kann durch die Funktion $m = 111,4 w^{-2,3} + 0,03$ beschrieben werden [5].

5 NIL Stempelherstellung

Vom NIL Polymermaster wurde ein NIL Stempel mit einem negativen Fotolack (UVAS1, EVG) mittels UV-Aushärtung abgeformt. Die Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM)-Aufnahmen der abgeformte Stempelstruktur sind in Abbildung 4 gezeigt. Das maximal realisierte Aspektverhältnis erhöht sich auf 0,54 wobei die minimale Stempelstruktur eine Breite von $1,73 \pm 0,08 \mu\text{m}$ hat.

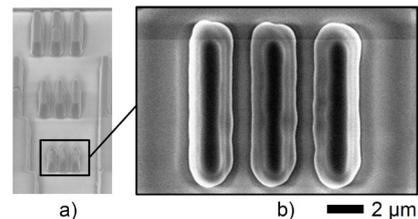


Abbildung 3: Kleinsten Stempelstrukturen in a) und die kleinste Stempelstruktur $1,73 \pm 0,08 \mu\text{m}$ in b) [5].

6 Zusammenfassung

Mit dem vorgestellten Lithografiesystem ist eine schnelle und präzise photolithografische Masterherstellung mit einer Inkjet-gedruckten Fotomaske möglich. Das Lithografiesystem verhindert die Abbildung der Druckpunktrauheit und gleichzeitig ermöglicht die Verwendung eines nicht-linearen Fotolacks die Entwicklung steiler Kanten und verbessert die Systemauflösung (Lithografiesystem + Fotolack) um 5% auf 30,6 lp/mm. Somit können präzise Masterstrukturen im einstelligen Mikrometerbereich hergestellt und mit einem herkömmlichen Stempelmaterial abgeformt werden.

Literatur

- [1] C. Pina-Hernandez *et al.*, "A route for fabricating printable photonic devices with sub-10 nm resolution" (2013)
- [2] G. Calafiore *et al.*, "Step-and-repeat nanoimprint on pre-spin coated film for the fabrication of integrated optical devices," (2015)
- [3] M.-A. Mattelin *et al.*, "Fabrication and replication of high efficiency blazed gratings with grayscale electron beam lithography and UV nanoimprint lithography," (2020)
- [4] W. Liu, J. Wang, X. Xu, C. Zhao, X. Xu, and P. S. Weiss, "Single-Step Dual-Layer Photolithography for Tunable and Scalable Nanopatterning," (2021)
- [5] S. Burkert, C. Eder, and A. Heinrich, "Investigation of Inkjet-Printed Masks for Fast and Easy Photolithographic NIL Masters Manufacturing," (2023)