

Zerstörungsfreie multimodale Analyse von polymerbasierten Mikro- und Nanostrukturen für die Nanoimprint Lithographie

S. Burkert*, L. Schwörer*, T. Schubert**, J. Grundmann***, D. Stein****, A. Heinrich*

* Zentrum für optische Technologien, Hochschule Aalen

** Institut für Materialforschung, Hochschule Aalen

*** Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig

**** Institut für Physik, Universität Augsburg

mailto: selina.burkert@hs-aalen.de

Bei der Bewertung von replizierten polymerbasierten Mikro- und Nanostrukturen ist es wesentlich, die Formtreue im Abformprozess quantifizieren zu können. Um auch komplexe Polymerstrukturen mit hohen Aspektverhältnissen oder Hinterschnitten zerstörungsfrei und in weiteren Dimensionen (topologisch, optisch, usw.) bewerten zu können, werden Messtechniken wie die Weißlichtinterferometrie, Rasterkraftmikroskopie, optische Kohärenztomographie, Rasterelektronenmikroskopie, Mikrocomputertomographie, Phasenkontrastmikroskopie und abbildende Müller-Matrix-Ellipsometrie miteinander in Bezug gesetzt. Die dafür notwendigen Teststrukturen wurden mit Zwei-Photonen-Lithografie hergestellt. Anhand der diskutierten Messtechnologien ist es möglich, je nach Strukturtyp und Fragestellung ein geeignetes Messmittel zu wählen um die Mikro- und Nanostrukturen zerstörungsfrei zu evaluieren. Somit können weitere Erkenntnisse über das Abformverhalten von Polymerstrukturen eruiert werden.

1 Einführung

Die Nanoimprint-Lithographie (NIL) hat sich als vielversprechende Technologie für die präzise und kostengünstige Herstellung mikroskopischer Strukturen etabliert. Sie ermöglicht die schnelle Replikation von Strukturen mittels polymerbasierter Arbeitsstempel und wird häufig zur Replikation optischer Elemente wie Wellenleiter und diffraktive Strukturen diskutiert [1–4]. Zur Evaluierung der Replikation kommen verschiedene Messmethoden zum Einsatz, von zweidimensionaler Rasterelektronenmikroskopie (REM) [5] bis hin zu dreidimensionalen Verfahren wie Rasterkraftmikroskopie (AFM) [6] und Weißlichtinterferometrie (WLI) [7]. Auch optische Eigenschaften werden mittels Scatterometrie [8] oder diffraktiver Tests [9] beurteilt. Diese Arbeit vergleicht und bewertet verschiedene nicht-destruktive Messtechniken für polymerbasierte Strukturen wie die Weißlichtinterferometrie (WLI), Rasterkraftmikroskopie (AFM), optische Kohärenztomographie (OCT), Rasterelektronenmikroskopie (ESEM), Mikro-computertomographie (μ CT), Phasenkontrastmikroskopie (PCM) und abbildende Müller-Matrix-Ellipsometrie (MME). Dabei werden die Grenzen hinsichtlich der lateralen Auflösung und des maximalen Aspektverhältnisses untersucht. Außerdem wurden geeignete Polymereigenschaften vermessen und spezifische Vorteile und Anwendungsbereiche der Messsysteme herausgearbeitet. Ziel ist es, ein umfassendes Verständnis der Stärken und Grenzen

verschiedener Messsysteme im Kontext der NIL zu entwickeln und damit zur Verbesserung der Qualitätskontrolle in der Herstellung optischer Elemente beizutragen.

2 Messsysteme

In den nachfolgenden Untersuchungen wurde ein WLI, ein AFM, ein OCT, ein ESEM, ein μ CT, ein PCM und ein MME verwendet. Die Systembezeichnung und Hersteller sind in Tab. 1 angegeben.

Tab. 1 Verwendete Messsysteme in den Untersuchungen

| System | System | Bezeichnung |
|----------|---|--|
| WLI | NewView8300 | Zygo |
| AFM | EDU-AFM1/M | Thorlabs |
| OCT | Spectral-domain OCT nach VDI / VDE 5565 | Nicht kommerziell |
| ESEM | Prisma ESEM | Thermo Fisher Scientific |
| μ CT | Xradia Versa 610 | Zeiss |
| PCM | BZ-X800 | Keyence |
| MME | Abbildendes Müller-Matrix-Ellipsometer | Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig |

3 Untersuchung der Grenzen der lateralen Auflösung und des maximalen Aspektverhältnisses

Für die Evaluation der lateralen Auflösungsgrenze und des maximalen Aspektverhältnisses wurden

polymerbasierte Säulenstrukturen verwendet, wie sie in der WLI Aufnahme in Abb. 1 zu erkennen sind. Dabei wurde die Säulenhöhe und -breite variiert, sodass mit Säulenbreiten von 200 nm bis 20 µm Aspektverhältnisse von 0.1 bis 2.86 erfolgreich mittels Zwei-Photonen-Lithographie (System: QuantumX, Polymer: IP-Dip, Nanoscribe) realisiert wurden.

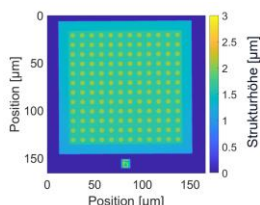


Abb. 1 WLI Aufnahme eines Säulenfelds mit Säulen einer Breite von 5 µm und einer Höhe von 0,5 µm.

Unter Berücksichtigung der Messabweichung (Residuen) und des Einflusses der Standardabweichung auf die Wiederholbarkeit (Standardabweichung) wurden die Messmittel untersucht. Es wird angenommen, dass die maximal messbare Säulenbreite der Bildbreite des jeweiligen Messmittels entspricht. Somit wurden Anwendungsgebiete der Messsysteme von ihrer empirisch ermittelten Auflösungsgrenze (min. empfohlene Strukturbreite w_{min}) bis zur maximalen Bildbreite (max. Strukturbreite w_{max}) definiert. Dabei wird auch das maximal gemessene Aspektverhältnis A_{max} mit angegeben. Die Grenzpunkte der Anwendungsgebiete sind in Tab. 2 zusammengefasst. Zu der µCT Messung wird angemerkt, dass nur eine Messung aufgrund mangelnden Kontrastes des Polymers erfolgen konnte. Für weitere µCT Messungen müssen noch längere Messzeiten (> 48 h) gewählt oder absorptions erhöhende Elemente wie Barium oder Silber dem Polymer untergemischt werden [10].

Tab. 2 Grenzen der empfohlenen Anwendungsgebiete der Messsysteme hinsichtlich der minimalen w_{min} und maximalen w_{max} Strukturbreite und des maximalen Aspektverhältnisses A_{max} .

| System | w_{min} [µm] | w_{max} [µm] | A_{max} |
|--------|----------------|----------------|-----------|
| WLI | 1,4 | 166 | 2,86 |
| AFM | 0,8 | 2,8 | 1,25 |
| OCT | 2,8 | 3,9 | 0,4 |
| ESEM | 0,4 | 13 | 2,86 |
| µCT* | 1,4 | 358,9 | 0,36 |
| PCM | 20 | 361,9 | 0,3 |
| MME | 1,4 | 89,7 | 2,86 |

4 Untersuchung der Messfähigkeit anhand geneigter Gitter

Im Rahmen der Untersuchung der Messfähigkeit von geneigten Polymergittern (IP-Dip, Nanoscribe), wurde die Höhe h des Gitters von 1 µm bis 30 µm bei einem konstanten Aspektverhältnis von 1 variiert. Dabei wurde jede Strukturhöhe auch mit Neigungswinkeln α von 0° bis 40° realisiert. Die OCT Aufnahme eines 30 µm Gitters mit einem

Neigungswinkel von 40° ist in Abb. 2 in der Draufsicht (links) und im Querschnitt (rechts) beispielhaft dargestellt.

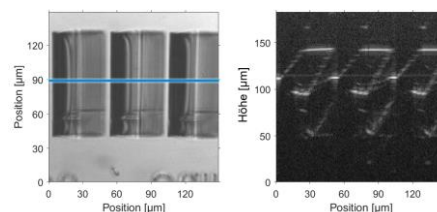


Abb. 2 OCT Aufnahme eines geneigten Gitters mit einer Höhe von 30 µm und einer Neigung von 40° in der Draufsicht (links) und im Querschnitt (rechts).

Aus der Untersuchung mit geneigten Gittern wurden weitere Anwendungsgebiete abgeleitet. Die Grenzen der Anwendungsgebiete hinsichtlich der minimalen Gitterhöhe h und des minimalen Neigungswinkels α sind in Tab. 3 aufgeführt. Demnach eignen sich das ESEM und das MME für kleine Gitterstrukturen. Das WLI und das OCT sind fähig größere Gitter aufzunehmen. Das AFM und das PCM eignen sich nicht für geneigte Gitterstrukturen, da die Abtastspitze des AFMs an den Überhängen verankert und es bei der PCM Messung zu Lichtbrechung an den Innenkanten der Strukturen kommt.

Tab. 3 Grenzen der Messfähigkeit der Messsysteme unter Beachtung der Gitterhöhe h mit einem konstanten Aspektverhältnis von 1 und des Neigungswinkels α .

| System | h [µm] ($A=1$) | α [°] |
|--------|--------------------|--------------|
| WLI | >10 | >30 |
| AFM | >1, <3 | 0 |
| OCT | >10 | >30 |
| ESEM | >1 | >0 |
| PCM | >1 | 0 |
| MME | >1 | >0 |

Literatur

- [1] C. Pina-Hernandez *et al.*, "A route for fabricating printable photonic devices with sub-10 nm resolution," *Nanotechnology*, early access. doi: 10.1088/0957-4484/24/6/065301.
- [2] G. Calafiore *et al.*, "Step-and-repeat nanoimprint on pre-spin coated film for the fabrication of integrated optical devices," *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, vol. 14, no. 3, p. 33506, 2015, doi: 10.1117/1.JMM.14.3.033506.
- [3] M.-A. Mattelin *et al.*, "Fabrication and replication of high efficiency blazed gratings with grayscale electron beam lithography and UV nanoimprint lithography," p. 3, doi: 10.1117/12.2542171.
- [4] V. J. Einck *et al.*, "Scalable Nanoimprint Lithography Process for Manufacturing Visible Metasurfaces Composed of High Aspect Ratio TiO₂ Meta-Atoms," *ACS Photonics*, vol. 8, no. 8, pp. 2400–2409, 2021, doi: 10.1021/acsphotonics.1c00609.
- [5] K. Osari, N. Unno, J. Taniguchi, K. Machinaga, T. Ohsaki, and N. Sakai, "Evaluation of filling behavior on UV nanoimprint lithography using release coating," *Microelectronic Engineering*, vol. 87, 5–8, pp. 918–921, 2010, doi: 10.1016/j.mee.2009.11.175.
- [6] A. Peter Amalathas and M. M. Alkai, "Efficient light trapping nanopillar structures for solar cells patterned using UV nanoimprint lithography," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 57, pp. 54–58, 2017, doi: 10.1016/j.mssp.2016.09.032.
- [7] I. Memon, Y. Shen, A. Khan, C. Woit, and H. Hillmer, "Highly uniform residual layers for arrays of 3D nanoimprinted cavities in Fabry–Pérot-filter-array-based nanospectrometers," *Appl Nanosci*, vol. 6, no. 4, pp. 599–606, 2016, doi: 10.1007/s13204-015-0468-9.
- [8] R. M. Al-Assaad, "Physical characterization of nanoimprinted polymer nanostructures using visible light angular scatterometry," *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, vol. 7, no. 1, p. 13008, 2008, doi: 10.1117/1.2894772.
- [9] D. Hasko *et al.*, "Structural and optical characterization of photonic structures prepared by nanoimprint technology," in *Photonics, Devices, and Systems IV*, Prague, Czech Republic, P. Tománek, D. Sederáková, and M. Hrabovský, Eds., 2008, p. 713824, doi: 10.1117/12.818074.
- [10] L. E. Criga, J. Wengenroth, H. Tiainen, M. Ionita, and H. J. Haugen, "Enhanced X-ray absorption for micro-CT analysis of low density polymers," *Journal of biomaterials science. Polymer edition*, early access. doi: 10.1080/09205063.2016.1152856.