

# Fasergekoppelter konfokaler Sensor zur exakten Abstandsregelung für maskenlose Lithografieanwendungen

*Johannes Kirchner<sup>1</sup>, Rostyslav Mastylo<sup>1</sup>, Uwe Gerhardt<sup>1</sup>, Taras Sasiuk<sup>1</sup>, Laura Weidenfeller<sup>1</sup>, Martin Hofmann<sup>2</sup>, Michael Kühnel<sup>1</sup>, Stefan Sinzinger<sup>3</sup>, Eberhard Manske<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, Gustav-Kirchhoff-Str. 1, 98693 Ilmenau, De

<sup>2</sup>Fachgebiet Mikro- und nanoelektronische Systeme, Gustav-Kirchhoff-Str. 1, 98693 Ilmenau, De

<sup>3</sup>Fachgebiet Technische Optik, Helmholtzring 1, 98693 Ilmenau, De

## Zusammenfassung

Maskenlose Fotolithografie findet auch abseits der Halbleitertechnik hohe und immer weiterwachsende Bedeutsamkeit [1, 2]. Als dauerhaftes und wesentliches Entwicklungsziel hat sich die Vergrößerung der Packungsdichte der Mikro- bzw. Nanostrukturen herausgestellt. Dazu ist es nötig die angewendeten Lithografieprozesse zu optimieren und die Strukturen mit sehr hoher Präzision und einer sehr guten Reproduzierbarkeit zu fertigen. Eine Form der maskenlosen Lithografie wird durch Direct-Laser-Writing (DLW) beschrieben [3]. Bei diesem Prozess ist die Strukturbreite von der Fokussierbarkeit und der axialen Ausrichtung des verwendeten Fabrikationslasers abhängig. Um die Präzision dieser Lithografieanwendung und der zu entwickelnden Strukturgeometrie zu erhöhen, wird eine Nanopositionier- und Nanomessmaschine (NPMM) zur relativen Ausrichtung der beschichteten Probe zum Laserstrahl verwendet [4]. Ein neuentwickelter chromatisch-konfokaler Sensor scannt dafür die Topographie der Probenoberfläche und regelt den Maschinenhub so nach, dass der Polymerisationsprozess stets in der Brennebene des Fabrikationslasers stattfindet.

**Keywords:** Nano-CMMs, konfokale Sensorik, maskenlose Lithografie, Direct-Laser-Writing

## 1 Einleitung

Ein zentraler Forschungsbereich der Mikro- und Nanofabrikationstechnik beschäftigt sich mit der Auslegung und Umsetzung adäquater Positionier- und Messwerkzeuge. Durch die Realisierung und Entwicklung von Nano-Koordinatenmessmaschinen (Nano-CMMs) wurden die quantifizierbaren Größen Auflösung und Wiederholbarkeit in den letzten 20 Jahren kontinuierlich gesteigert [5]. Die Messunsicherheit solcher Maschinen sank dabei im Laufe der Entwicklung immer weiter [6]. Die präzise Positioniertechnik von Nano-CMMs im Bereich weniger Atombreiten bildet die Grundlage vieler neuer Anwendungsbereiche. Dazu gehören neben hochpräzisen Oberflächen-, Kontur- und Abstandsmessungen nun auch die Nanofabrikationstechnik. Dabei werden klassische und neue Fertigungsverfahren so optimiert, dass Strukturgrößen im Bereich von Mikro- bzw. Nanometern realisierbar werden. Zu den üblichen Fabrikationsmethoden für solche Abmessungen gehören u.a. die Field-Emission Scanning Probe Lithography (FE-SPL) [7], Nanoimprint Lithography (NIL) [8] und Soft-NIL [9], AFM-Scratching [10] sowie Direct-Laser-Writing (DLW) [11]. Beim DLW werden Fotolacke (Photoresiste) auf die Probe aufgetragen. Wird dieser Resist mit einer be-

stimmten Wellenlänge belichtet, polymerisiert er an dieser Stelle. Durch die anschließende Entwicklung des Lacks, nimmt die geschriebene Struktur eine reale Geometrie an und wird sichtbar [3]. DLW zeichnet sich vor allem als maskenlose, berührungslose, vergleichsweise schnelle und flexible Strukturierungsmethode aus. Während die FE-SPL Schreibgeschwindigkeiten von nur einigen Mikrometern pro Sekunde erreicht, können beim DLW problemlos mehrere Millimeter pro Sekunde strukturiert werden [12, 13]. Die klassische Halbleiterlithografie erreicht aufgrund simultaner Flächenbelichtung zwar noch höhere Produktionsgeschwindigkeiten - bedingt durch die Verwendung von Masken ist dieser Prozess in seiner Flexibilität und Anwendbarkeit jedoch sehr eingeschränkt und ausschließlich für hohe Stückzahlen ausgelegt. DLW-Lithografie ist sowohl für zwei- als auch dreidimensionale Strukturen realisierbar. Die dreidimensionale Methodik wird dabei durch Zwei- bzw. Mehrphotonen-Polymerisationsprozesse umgesetzt [14]. Diese Anwendung gehört zu den additiven Fertigungsverfahren und kann mit einem 3D-Druck auf mikroskopischer Ebene verglichen werden [15]. Zahlreiche Veröffentlichungen weisen auf eine hohe Anwendung dieser Technik vor allem in der Biomedizintechnik hin [1, 2]. Die Vergrößerung der Packungsdichte

steht bei Nanofabrikationsprozessen oft im Vordergrund, um immer mehr Strukturen auf immer kleineren Raum zu platzieren. Die Packungsdichte ist vom Abstand (Pitch) zweier Strukturen zueinander und somit von der erzeugten Strukturbreite abhängig. Um möglichst geringe Strukturbreiten zu erreichen, ist bei DLW-Anwendungen die korrekte Ausrichtung der Laserfokusebene zur Bearbeitungsfläche (2D) bzw. dem Bearbeitungsvolumen (3D) ein zentraler Untersuchungsgegenstand.

## 2 Nanopositionier- und Nanomessmaschine

Mit der Entwicklung der Nanopositionier- und Nanomessmaschinen (NPMM), stehen dem Institut für Prozessmess- und Sensortechnik der Technischen Universität Ilmenau Nano-CMMs höchster Präzision zur Verfügung. Diese dienen als Grundlage für künftige Nanofabrikationsarbeiten. Mit einer Auflösung von mehr als 1 nm, einer Positionierwiederholbarkeit von besser als 2 nm und einer 3D-Messunsicherheit von unter 10 nm über dem gesamten Arbeitsvolumen von (25 x 25 x 5) mm<sup>3</sup> erreichen NPMM die nötige Präzision und einen ausreichenden Arbeitsbereich für DLW-Anwendungen [16, 17]. Um das Abbesche Komparatorprinzip einzuhalten, arbeiten diese Präzisionsmaschinen im Sample Scanning Mode (vgl. Abb. 1) [4, 18]. Dafür werden die Interferometer (1, 2, 3), sowie der Oberflächensensor (4), fest am metrologischen Rahmen (5) der Koordinatenmessmaschine angebracht. Die optischen Interferometerachsen, sowie die (mechanische bzw. optische) Sensorspitze, schneiden sich virtuell im Abbepunkt (6). Das Messobjekt wird auf dem beweglichen Probenstisch (7) platziert. Der Probenstisch wird in lateraler Richtung vom Bediener gesteuert. Die axiale Regelung übernimmt die Maschinensteuerung, so dass die Oberfläche der Probe ebenfalls kontinuierlich im Abbepunkt nachgeführt wird. Dafür wertet die Maschinensteuerung die Signale des Sensors aus und übermittelt eine Korrekturbewegung an den z-Antrieb des Tisches. Die Korrekturbewegung des Probenstisches wird durch die Interferometer erfasst. Die gemessene Tischbewegung repräsentiert folglich die Oberfläche des Prüfkörpers. Um eine solch hochgenaue Probenplatzierung zu gewährleisten, wurden speziell entwickelte Direktantriebe verbaut. Das dynamische Verhalten dieser Antriebe ist nahezu linear und ermöglicht auch bei hohen Geschwindigkeiten eine sehr präzise Positionierung [19, 20]. Mit einer maximalen Verfahrensgeschwindigkeit von über 5 mm/s ermöglichen NPMM im Hinblick auf Nanofabrikationsanwendungen einen hohen Durchsatz [6].

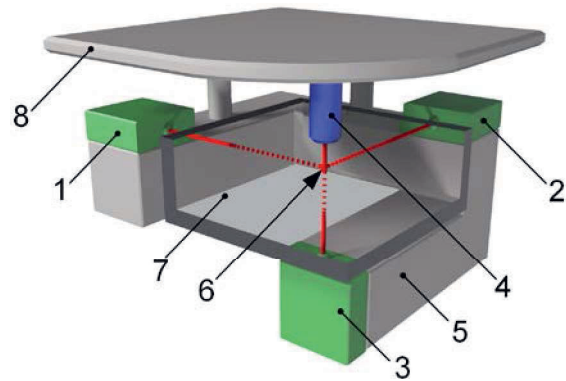


Abb. 1: Prinzipdarstellung der NPMM: 1, 2, 3 - Interferometer; 4 - Oberflächensensor; 5 - metrologischer Rahmen; 6 - Abbepunkt; 7 - beweglicher Probenstisch; 8 - Sensorplatte

## 3 Entwicklung des Oberflächensensors

### 3.1 Sensoranforderungen

Für den beschriebenen Anwendungsbereich der NPMM ist ein neues Sensorsystem erforderlich. Optische Verfahren haben sich für diese Zwecke bewährt. Methodisch werden dafür spezielle Eigenschaften des Lichts ausgenutzt. So sind in der Literatur häufig astigmatische und interferenzoptische Lösungen oder das Foucaultsche Schneidverfahren zu finden [21–23]. Eine weitere optische Eigenschaft, die chromatische Aberration, wird bei chromatisch-konfokaler Sensorik bzw. Mikroskopie ausgenutzt [24]. Durch die Entwicklung des Fokussensors ist zwar ein adäquates optisches System zum präzisen Messen vorhanden, jedoch ist der Sensor auf eine numerische Apertur von  $NA = 0,6$  ausgelegt und wird somit in seiner lateralen Auflösung begrenzt [6, 25]. Die Breite der Strukturen hängt jedoch umgekehrt proportional von der numerischen Apertur der verwendeten Optik ab (vgl. Gl. 1). Eine möglichst hohe NA führt also zu geringeren Strukturbreiten [26]. Das neue Sensorsystem muss somit auch bei Verwendung von Objektiven höherer numerischer Apertur zuverlässig arbeiten. Zur Reduzierung thermischer Einflüsse wird ein fasergekoppeltes Prinzip verfolgt. Durch Verwendung dieser Lichtwellenleiter (LWL) können wärmeeinbringende Lichtquellen außerhalb des Messaufbaus positioniert werden, ohne dabei das messtechnische Prinzip zu beeinflussen. Die Integrierbarkeit einer weiteren Laserdiode zur Auslösung des Polymerisationsprozesses im Photoresist bestimmt den konstruktiven Rahmen der Kopplung zwischen Sensorkopf und Objektiv und wird mittels Strahlteilerwürfel umgesetzt.

### 3.2 Konzept des neuen Sensors

Ein entsprechender Messaufbau wird in [27] beschrieben. Das Konzept basiert auf dem chromatisch-konfokalen Prinzip. Die Funktionsweise wird in Abbildung 2 deutlich. Das Licht zweier Laserdioden unterschiedlicher Wellenlänge ( $\lambda_{M1}$ ,  $\lambda_{M2}$ ) wird mittels Lichtwellenleiter-Koppler (1) in einer Faser kombiniert. Im Unterschied zu anderen chromatisch-konfokalen Sensoren fungiert hier das Faserende (2) selbst als konfokale Blende. Hinter der Faser breitet sich das Licht divergent aus und wird durch die Linse (3) kollimiert. In der Fokuslinse (4) kommt es zur Dispersion. Durch die chromatische Aberration entstehen die Fokuspunkte der beiden Laserwellenlängen in unterschiedlichen Ebenen entlang der optischen Achse [28]. Der relative axiale Abstand beider Fokuspunkte wird Schnittweitendifferenz genannt und wird, bei genauer Kenntnis der optischen Komponenten, durch die Sellmeier-Gleichung beschrieben [29]. Das Licht wird vom Messobjekt (5) reflektiert und auf dem Rückweg wieder in den Lichtwellenleiter eingekoppelt. Die rückgekoppelte Lichtintensität ist abhängig von der Position des Messobjekts. Steht das Messobjekt exakt in der Fokusebene einer respektiven Lichtwellenlänge, wird der messbare Rückreflex des entsprechenden Lasers maximiert. Am anderen Ende der Faserkombination trennen Farbfilter (6) die beiden Wellenlängen wieder, sodass zwei separate Intensitätssignale mit Hilfe der Pho-

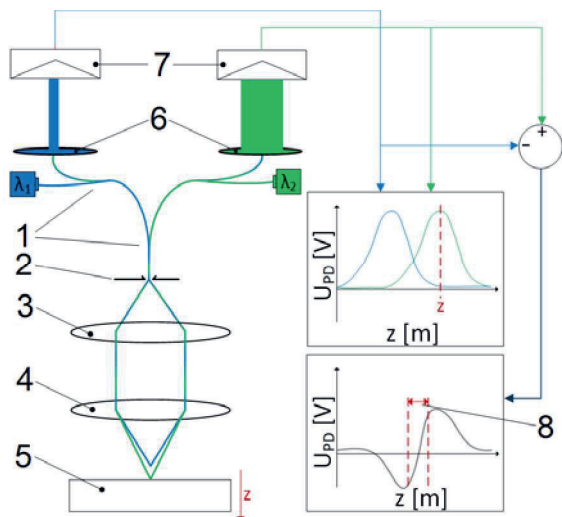


Abb. 2: Konzept des chromatisch-konfokalen Sensors: 1 - Lichtwellenleiter-Koppler (LWL-Koppler); 2 - Faserende (konfokale Blende); 3 - Kollimatorlinse; 4 - Fokuslinse; 5 - Messobjekt; 6 - Farbfilter; 7 - Photodioden; 8 - Arbeitsbereich zur Regelung der NPMM

todioden (7) aufgezeichnet werden können. Werden die Intensitäten über den axialen Verstellweg  $z$  aufgezeichnet, erhält man nach Differenzbildung beider Signale einen annähernd linearen Bereich, der als Arbeitsbereich (8) zur Maschinenregelung genutzt wird.

### 3.3 Komponentenwahl und Konzeptprüfung

Die Auswahl der Laserdioden bestimmt das gesamte optische Design des Systems. Da der Sensor für DLW-Anwendungen genutzt werden soll, müssen die Messlaser in einem anderen Wellenlängenbereich als der Bearbeitungslaser liegen, da ansonsten schon während des Messvorgangs eine Resistpolymerisation ausgelöst wird. Das Rayleigh-Kriterium ist ein Maß für die Spotgröße von Licht in der Fokusebene und beschreibt somit die spätere theoretische Strukturbreite [26]. Diese hängt von der numerischen Apertur der verwendeten Optik, sowie von der Wellenlänge  $\lambda$  des Lasers nach Gl. (1) ab und soll für den Bearbeitungslaser minimiert werden:

$$R = \frac{1,22\lambda}{NA} \quad (1)$$

In [26] werden erzeugte Strukturbreiten von  $b = R < 300$  nm beschrieben. Diese werden bei einer Wellenlänge von  $\lambda_P = 405$  nm und einer numerischen Apertur von  $NA = 0,9$  erzeugt und liegen somit sogar unter dem theoretisch berechneten Limit von  $R = 549$  nm. Für die Strukturierungsarbeiten mit NPMM werden für die Bearbeitungslaser ebenfalls möglichst kurze Wellenlängen, im Farbbereich UV bis Blau, vorgesehen. Die Messwellenlängen müssen daher in einem anderen spektralen Bereich liegen.

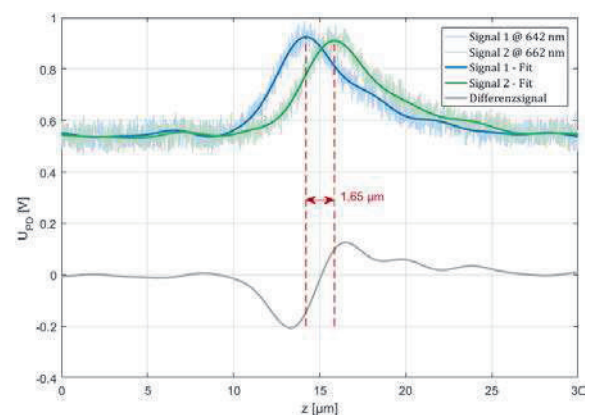


Abb. 3: Konzeptprüfung: Gemessen wird die Photospannung  $U_{PD}$  entlang der optischen Achse  $z$ . Die Signale bilden sich wie erwartet aus (vgl. Abb. 2). Im Differenzsignal entsteht zwischen den Peaks ein nahezu linearer Bereich von  $1,65 \mu\text{m}$ .

Für den Versuchsaufbau werden rote Laserdioden verwendet. Die Wellenlängen dieser Laser betragen  $\lambda_{M1} = 642 \text{ nm}$  und  $\lambda_{M2} = 662 \text{ nm}$ . Der Aufbau erfolgt nach dem beschriebenen Konzept (vgl. Abb. 2). Die aufgenommenen Spannungen der Photodioden werden elektronisch verstärkt und unter Nutzung eines 8-Bit AD-Wandlers digitalisiert. Ein Planspiegel dient als Messobjekt. Die Höhenänderung zur Fokuspunkt durchfahrt wird mit der NPMM realisiert. In Abbildung 3 werden die aufgenommenen Photospannungssignale in Abhängigkeit der axialen Spiegelposition dargestellt. Das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) der Rohsignale ist noch relativ schlecht. Nur durch entsprechendes Fitten der Signale entsteht ein linearer Bereich im Differenzsignal. Und dennoch belegen die Signale die Funktionalität des Messprinzips. Es ist gut zu erkennen, dass aufgrund der Schnittweitendifferenz ein messbarer Abstand zwischen den Fokuspunktebenen der zwei Laser ausgebildet wird und ein Arbeitsbereich  $> 1 \mu\text{m}$  entsteht, der nach Signaloptimierung zur Regelung der Hochpräzisionsmaschinen genutzt werden kann.

### 3.4 Aufbau des Sensorsystems

Zur Verbesserung des SNR werden konzeptionelle und konstruktive Maßnahmen getroffen (vgl. Abb. 4 und Abb. 5). Ein Gehäuse schirmt die Verstärkerelektronik (1), sowie andere elektrische Bauteile und Leitungen ab. Im Gehäuse befinden sich zwei parallel aufgebaute optische Kanäle. Die verbauten Temperaturcontroller (2) verhindern ein thermisches Driften der Wellenlängen der Laserdioden (3). Die

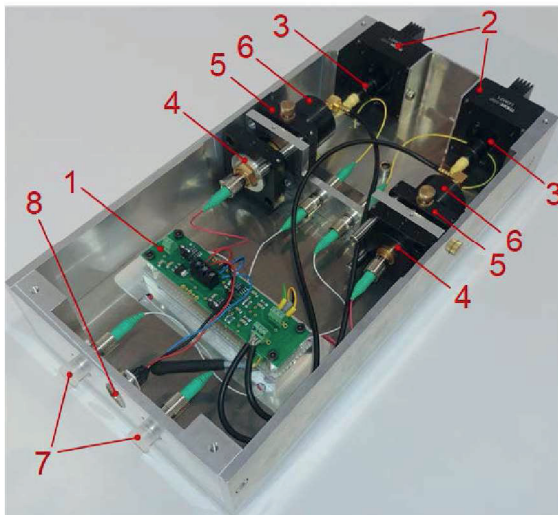


Abb. 4: Aufbau des Sensors: 1 - Verstärkerelektronik; 2 - Temperaturcontroller; 3 - Laserdioden; 4 - Faserkollimatoren; 5 - Justierelemente; 6 - Photodioden; 7 - optische Schnittstelle; 8 - serielle Schnittstelle

Faserenden, an denen die rückgekoppelten Photospannungen gemessen werden, werden mit Faserkollimatoren (4) ausgestattet. Pro Kanal dient ein Justierelement (5) der lateralen Ausrichtung der Photodioden (6). Mit diesem kann die Signalstärke der einzelnen Kanäle unabhängig voneinander verändert werden, um die Signalpeaks zueinander anzupassen. Der Lichtwellenleiter-Koppler (11), der beide Wellenlängen zusammenführt, wird an den optischen Gehäusedurchführungen (7) angebracht. Über die serielle Schnittstelle (8) werden die vorverstärkten Spannungssignale an den A/D-Wandler der NPMM übergeben. Der Sensorkopf (9) ist mit einem einstellbaren Kollimator (10) verbunden. Die Sensorkopfaufnahme an der Sensorplatte (12) ist mit einem Objektiv (13) hoher numerischer Apertur ausgestattet, um den Lichtfleck auf der Probe (14) möglichst klein zu halten und somit die laterale Auflösung zu erhöhen. Eine Kamera (15) dient der Beobachtung der zu scannenden Oberfläche. An Stelle der Kamera können seitlich auch andere Funktionsgruppen montiert werden. So wird für Strukturierungsversuche von dieser Position der Fabrikationslaser in den Strahlengang eingekoppelt. Zur Messung der Oberflächenneigung ist dort eine Positionsdioden (PSD) zur Verfolgung der Strahlauswanderung vorgesehen. Die Markerplatte (16) dient der Ausrichtung Laserstrahlen.

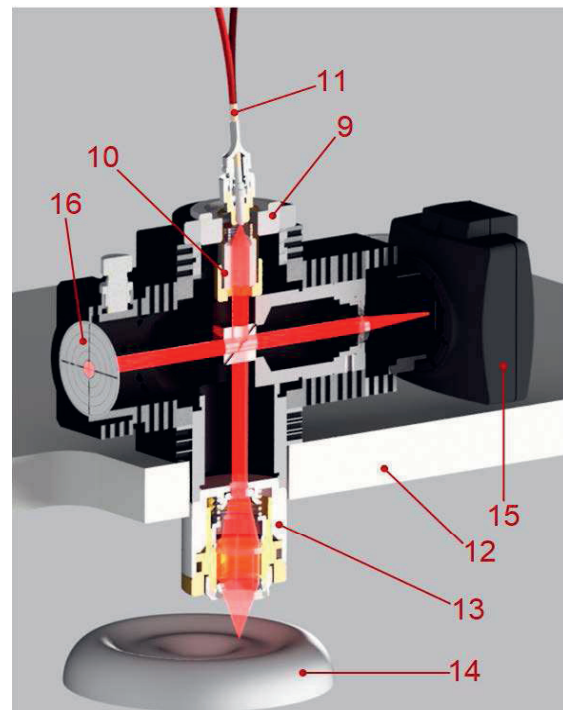


Abb. 5: Sensorkopfaufnahme: 9 - Sensorkopf; 10 - einstellbarer Faserkollimator; 11 - LWL-Koppler; 12 - Sensorplatte; 13 - Objektiv; 14 - Probe; 15 - Kamera; 16 - Markerplatte

Die Funktionsprüfung des Aufbaus erfolgt kongruent zur Konzeptprüfung (Abb. 3) anhand der rückgekoppelten Signalstärke. Abbildung 6 zeigt die beiden Signale. Verglichen mit der Konzeptprüfung ist eine deutlich geringeres SNR zu sehen. Der Signalpeak ist von ungefähr 380 mV auf etwa 1610 mV angestiegen (nach Abzug des Offsets) und hat sich somit mehr als vervierfacht. Das Signalrauschen hat sich von circa 100 mV auf etwa 20 mV verringert. Das Aufstellen eines adäquaten Arbeitsbereichs zur Regelung der NPMM ist mit einer solchen Signalqualität problemlos möglich.

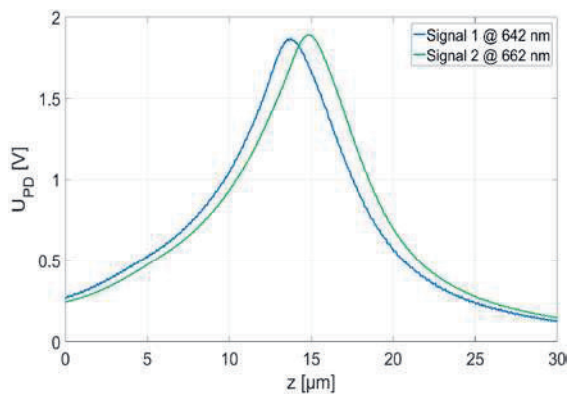


Abb. 6: Sensorsignale nach Überarbeitung des Aufbaus.

### 3.5 Verschiebung des Arbeitsbereiches zur Optimierung des DLW-Prozesses

Für DLW-Anwendungen wird noch eine weitere Wellenlänge  $\lambda_P$  in den optischen Strahlengang eingekoppelt. Aufgrund der chromatischen Aberration im Objektiv kommt es zu unerwünschten Effekten hinsichtlich der Strukturbreiten [28]. Abbildung 7a) verdeutlicht die Problematik. Die Schnittweiten der Messwellenlängen  $\lambda_{M1}$  und  $\lambda_{M2}$  (roter Farbbereich) spannen den Arbeitsbereich des Sensorsystems auf. Die Oberfläche des Photoresists wird von der NPMM auf die Mitte dieser beiden Schnittweiten positioniert und geregelt. Die Fokusebene des Fabrikationslasers (blauer bzw. ultravioletter Farbbereich) bildet sich auf der optischen Achse zwischen diesem Arbeitsbereich und dem Objektiv aus. Hinter der Fokusebene verlaufen die Strahlen divergent und belichten auf der Resistsschicht einen relativ großflächigen Bereich, was sich negativ auf die Breite der Strukturen auswirkt. Durch eine Schnittweitenkorrektur ist es möglich den Arbeitsbereich entlang der optischen Achse so zu verschieben, dass die Fokusebene des BearbeitungsLasers exakt mittig zwischen den Fokusebenen der Messlaser liegt und somit direkt auf der Resistoberfläche. Der DLW-Prozess findet somit direkt im Fokus des La-

sers statt, was zu einer extremen Verringerung der Strukturbreite führt. Umgesetzt wird diese Schnittweitenkorrektur durch Änderung des Kollimationszustandes des Messstrahls vor Objektiv Eintritt. Durch gezieltes konvergieren bzw. divergieren des Strahls, können die Schnittweiten der Messlaser und somit der Arbeitsbereich definiert verschoben werden (vgl. Abb. 7b)).

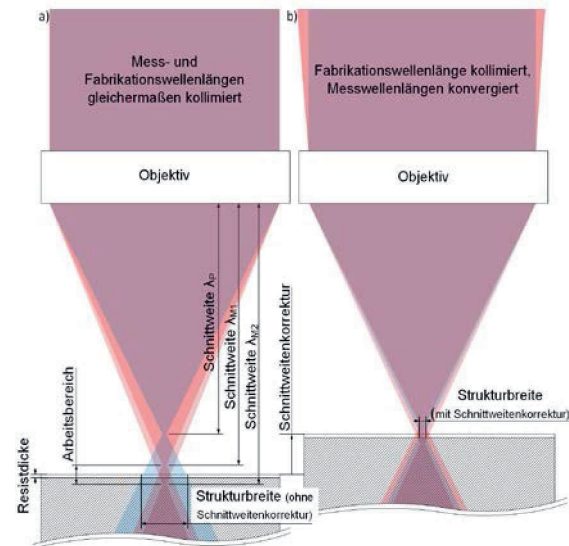


Abb. 7: Verschiebung des Arbeitsbereiches durch Dekollimation des Messstrahls: a) Mess- und Fabrikationslaser sind vor Objektiv eintritt gleichermaßen kollimiert. Es entsteht aufgrund des Farbblängsfehlers ein Schnittweitenversatz.

b) Der Messlaser wird vor dem Objektiv eintritt konvergiert. Das führt zu einem Ausgleich des Schnittweitenversatzes, so dass die Brennebene des Fabrikationslasers im Arbeitsbereich des Sensors liegt.

## 4 Fazit und Ausblick

Die Untersuchungen zum Aufbau des chromatisch-konfokalen Sensors haben gezeigt, dass sich die in die Faser rückgekoppelten Intensitätssignale wie erwartet ausbilden und dass das Faserende des Lichtwellenleiters somit als konfokale Blende nutzbar ist. Zwischen den Fokusebenen der zwei Messwellenlängen stellt sich ein axialer Abstand ein, der als Arbeitsbereich zur Regelung von Nanopositionier- und Nanomessmaschinen verwendet werden kann. Der Aufbau des Sensors sowie die Funktionsprüfung sind dargestellt und eine Strategie zur Verschiebung des Arbeitsbereiches erklärt. Da die chromatische Aberration ausschließlich von der verwendeten Optik abhängt, werden zunächst unterschiedliche Sensor-Objektiv-

Paarungen und ihre Auswirkung auf die Kennlinien und die Größe des Arbeitsbereiches untersucht. Je besser die Farbkorrektur einer Optik, desto kleiner wird sich der axiale Arbeitsbereich ausbilden. Die Distanz zwischen den Fokusebenen gibt letztlich Aufschluss über die mögliche Auflösung des Sensors. Darauf aufbauend wird in weiterführenden Untersuchungen die Langzeitstabilität des Aufbaus geprüft. Reproduzierbarkeitsmessungen und definierte Stufenhöhenmessungen werden folgen und eine Abschätzung der Messunsicherheit zulassen. Zur Anwendung des Messsystems für Direct-Laser-Writing muss zunächst die Schnittweite der Bearbeitungswellenlänge bestimmt werden. Ein Laser der Wellenlänge  $\lambda_P = 405$  nm steht dafür zur Verfügung. In [30] wird eine einfache Methodik zur Ermittlung der Fokusebene, unter Verwendung einer Photodiode, vorgestellt. Nachdem die Schnittweite bestimmt wurde, wird der Strahlengang der Messlaser so manipuliert, dass sich der Messbereich um die Fabrikationsbrennebene legt. Bereits ermittelte Parameter werden genutzt, um die Strukturbreiten der DLW-Lithografie zu verkleinern [13].

### Förderung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Graduiertenkollegs „Tip- and laser-based 3D-Nanofabrication in extended macroscopic working“ (GRK 2182) an der Technischen Universität Ilmenau.

### Literatur

- [1] C. M. B. Ho, S. H. Ng, K. H. H. Li, Y.-J. Yoon, *Lab on a chip* 18, 3627–3637, (2015); doi: 10.1039/C5LC00685F.
- [2] X. Li, R. Cui, L. Sun, K. E. Aifantis, Y. Fan, Q. Feng, F. Cui, F. Watari, *International Journal of Polymer Science* 24, 1–13, (2014); doi: 10.1155/2014/829145.
- [3] A. Selimis, V. Mironov, M. Farsari, *Microelectronic Engineering*, 83–89, (2015); doi: 10.1016/j.mee.2014.10.001.
- [4] G. Jäger, T. Hausotte, E. Manske, H.-J. Büchner, R. Mastlylo, N. Dorozhovets, N. Hofmann, *Measurement* 9, 1099–1105, (2010); doi: 10.1016/j.measurement.2010.04.008.
- [5] K. Takamasu, S. Ozawa, T. Asano, A. Suzuki, R. Furutani, S. Ozono. 1996. Basic concepts of nano-CMM (coordinate measuring machine with nanometer resolution). In.
- [6] E. Manske, T. Hausotte, R. Mastlylo, T. Machleidt, K.-H. Franke, G. Jäger, *Meas. Sci. Technol.* 2, 520–527, (2007); doi: 10.1088/0957-0233/18/2/S27.
- [7] M. Hofmann, C. Lenk, T. Ivanov, I. W. Rangelow, A. Reum, A. Ahmad, M. Holz, E. Manske, *Journal of Vacuum Science & Technology B* 36, 06JL02-1 - 06JL02-6, (2018); doi: 10.1116/1.5048193.
- [8] S. Y. Chou, P. R. Krauss, P. J. Renstrom, *Journal of Vacuum Science & Technology* 6, 4129–4133, (1996); doi: 10.1116/1.588605.
- [9] S. Supreeti, J. Kirchner, M. Hofmann, R. Mastlylo, I.W. Rangelow, E. Manske, M. Hoffmann, S. Sinzinger. 2019. Integrated soft UV-nanoimprint lithography in a nanopositioning and nanomeasuring machine for accurate positioning of stamp to substrate. In *Novel Patterning Technologies for Semiconductors, MEMS/NEMS, and MOEMS 2019*. SPIE, 44); doi: 10.1117/12.2514832.
- [10] R. R. Marangoni, J. Schleichert, I. Rahneberg, R. Mastlylo, E. Manske, T. Fröhlich, *tm - Technisches Messen* 9, 587–592, (2017); doi: 10.1515/teme-2016-0066.
- [11] L. Weidenfeller, R. Schienbein, J. Kirchner, C. Reinhardt, E. Manske. Development of laser positioning system of high accuracy in the nanometer range. In *Proc. SPIE*, 105440E-1 - 105440E-7); doi: 10.1117/12.2312704.
- [12] I. W. Rangelow, M. Kaestner, T. Ivanov, A. Ahmad, S. Lenk, C. Lenk, E. Guliyev, A. Reum, M. Hofmann, C. Reuter, M. Holz, *Journal of Vacuum Science & Technology B* 6, 06J102-1 - 06J102-9, (2018); doi: 10.1116/1.5048524.
- [13] J. Kirchner, L. Weidenfeller, U. Gerhardt, R. Mastlylo, M. Kühnel, S. Sinzinger, E. Manske. A combined laser scanning and DLW tool for measuring and fabrication tasks with NPMM.
- [14] S. Maruo, O. Nakamura, S. Kawata, *Opt. Lett.* 2, 132, (1997); doi: 10.1364/OL.22.000132.
- [15] C. M. B. Ho, S. H. Ng, Y.-J. Yoon, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 5, 1035–1046, (2015); doi: 10.1007/s12541-015-0134-x.
- [16] G. Jäger, E. Manske, T. Hausotte, A. Müller, F. Balzer, *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.* 3, 34004, (2016); doi: 10.1088/2051-672X/4/3/034004.
- [17] G. Jäger, E. Manske, T. Hausotte, H.-J. Büchner, *tm - Technisches Messen* 7-8/2000, (2000); doi: 10.1524/teme.2000.67.7-8.319.
- [18] E. Abbe. Messapparate für Physiker. In *Zeitschrift für Instrumentenkunde - Organ für Mitteilungen aus dem gesammten Gebiete der wissenschaftlichen Technik*, 446–448.
- [19] S. Hesse, C. Schäffel, H.-U. Mohr, M. Katzschmann, H.-J. Büchner, *Meas. Sci. Technol.* 7, 74011, (2012); doi: 10.1088/0957-0233/23/7/074011.
- [20] A. Amthor, S. Zschack, C. Ament. 2008. Position control on nanometer scale based on an adaptive friction compensation scheme. In *2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*. IEEE, 2568–2573); doi: 10.1109/IECON.2008.4758361.
- [21] C. Bricot, J. Leheureau, C. Puech, F. Carvenec, *IEEE Trans. Consumer Electron.* 4, 304–308, (1976); doi: 10.1109/TCE.1976.266827.
- [22] K. Naganuma, K. Mogi, H. Yamada, *Opt. Lett.* 7, 393, (1990); doi: 10.1364/OL.15.000393.
- [23] F. Zamkotsian and K. Dohlen, *Appl. Opt.* 31, 6532, (1999); doi: 10.1364/AO.38.006532.

- [24] G. Molesini, G. Pedrini, P. Poggi, F. Quercioli, *Optics Communications* 4, 229–233, (1984); doi: 10.1016/0030-4018(84)90179-2.
- [25] R. Mastilo, D. Dontsov, E. Manske, G. Jager. 2005. A focus sensor for an application in a nanopositioning and nanomeasuring machine. In . SPIE Proceedings. SPIE, 238); doi: 10.1117/12.612887.
- [26] F. Zhu and J.-Y. Ma, *Chinese Phys. Lett.* 4, 48102, (2014); doi: 10.1088/0256-307X/31/4/048102.
- [27] A. K. Ruprecht, C. Pruss, H. J. Tiziani, W. Osten, P. Lucke, A. Last, J. Mohr, P. Lehmann. 2005. Confocal micro-optical distance sensor. Principle and design. In . SPIE Proceedings. SPIE, 128); doi: 10.1117/12.612008.
- [28] R. E. Bedford and G. Wyszecki, *J. Opt. Soc. Am.* 6, 564\_1, (1957); doi: 10.1364/JOSA.47.0564\_1.
- [29] W. Sellmeier. Zur Erklärung der abnormen Farbenfolge im Spektrum einiger Substanzen. In *Annalen der Physik*, 272–282.
- [30] Y. Shimizu, T. Maruyama, S. Nakagawa, Y.-L. Chen, H. Matsukuma, W. Gao, *Meas. Sci. Technol.* 7, 74006, (2018); doi: 10.1088/1361-6501/aac0a6.