

Weitere Entwicklungen zum 2 Photonen direkten Laserschreiben zur großflächigen Nanostrukturierung

Annika-Verena Häcker*, Eberhard Manske*

*TU Ilmenau, Prozessmess- und Sensortechnik, Gustav-Kirchhoff-Str. 1, 98693 Ilmenau, Deutschland
mailto:annika-verena.haecker@tu-ilmenau.de

Um hochpräzise und großflächige Mikro- und Nanofabrikation zu realisieren, wurde ein Aufbau zum 2 Photonen direkten Laserschreiben entwickelt. Nun sollen der Aufbau zu einem vollständigen Laserschreibsystem ausgebaut und weitere Entwicklungen vorgestellt werden.

1 Einleitung

Zwei-Photonen-Absorptionsverfahren (2 PA) bieten die Möglichkeit, extrem feine Strukturen auf lichtempfindlichen Materialien zu erzeugen. Für das direkte Laserschreiben zur Mikro- oder Nanofabrikation werden Lasersysteme mit hochpräzisen Positioniersystemen kombiniert. Diese sind meist auf einen Positionierbereich von einigen hundert Mikrometern begrenzt bei Anwendungen auf der Basis von piezoelektrischen Tischen oder sogar nur relativ wenige zehn Mikrometer Positionierbereich bei Anwendungen, die auf Galvanometerscannern basieren. Diese Techniken sind zwar präzise, aber für größere Fertigungsbereiche sind Stitching-Methoden erforderlich. Daher wurde ein Aufbau aus einem Femtosekundenlaser für 2PA und einer Nanopositionier- und Nanomessmaschine (NMM-1) für das hochpräzise Laserschreiben auf größeren Flächen entwickelt [1]. Die NMM-1 wurde an der TU Ilmenau zusammen mit der SIOS Messtechnik GmbH entwickelt. Sie hat ein Positioniervolumen von 25 mm × 25 mm × 5 mm und eine Positionierauflösung im Sub-Nanometerbereich. Weiterentwicklungen des Systems sollen eine deutliche Verbesserung beim hochpräzisen und stitchingfreien Laserdirekt schreiben zur großflächigen Nanostrukturierung ermöglichen. Dazu müssen Femtosekundenlaser und NMM-1 zu einer funktionalen Einheit kombiniert werden, um komplexe Strukturen mit höchster Genauigkeit und Homogenität schreiben zu können.

2 Hintergrund

Das direkte Laserschreiben gehört zu den optischen Lithographieverfahren und kann auch für die Nanofabrikation genutzt werden. Der Vorteil dabei ist, dass, im Unterschied zur Photolithographie, keine komplexe Maskenherstellung erforderlich ist. Stattdessen ermöglicht das direkte Laserschreiben durch eine kontrollierte Belichtung des Resists, die für eine Photoreaktion notwendige Energie über einen Laserstrahl einzubringen. Vereinfacht gesagt werden durch die Beleuchtung die Photoinitiator-

moleküle vom Grundzustand in einen höheren Zustand versetzt. Die für den Übergang erforderliche Energiemenge kann entweder durch ein Photon oder durch mehrere Photone induziert werden. Die Summe muss gleich der erforderlichen Energie sein.

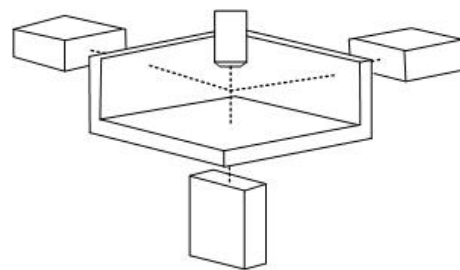


Fig. 1 Die vorliegende Grafik zeigt den messtechnischen Aufbau der Interferometer zur Positionsbestimmung des Probenstisches. Dadurch ist die Messung nach dem Abbe'schen Komparatorprinzip möglich [2].

Neben dem Belichtungsprinzip gehören die Positionsauflösung und die Wiederholbarkeit zu den wichtigsten Einschränkungen der Mikro- und Nanostrukturierung. Der Laserschreiber-Aufbau, dargestellt in Fig. 1, ist auf Basis der Nanomess- und Positioniermaschine, der NMM-1, entwickelt worden. Die Messung der Position des Probenstisches basiert auf dem Abbe'schen Komparatorprinzip, das eine Ausrichtung der Mess- und Objektachse voraussetzt. Um dieses Prinzip bei den Messungen zu realisieren, muss der Sensor in diesem Abbe-Punkt fixiert und die Probe relativ zum Sensor bewegt werden. Die Messung wird realisiert durch drei Laserinterferometer, die die Bewegung einer Spiegelecke messen. Diese Spiegelecke dient als Probenstisch.

3 Aufbau

Für die grundlegende Implementierung des direkten Laserschreibens mit dem Zwei-Photonen-Verfahren wurden ein Femtosekundenlaser und die Nanomess- und Positioniermaschine, NMM-1, auf einem optischen Tisch angeordnet. Der Femtosekundenlaserstrahl wurde über mehrere Spiegel so abgelenkt, dass er in die NMM-1 eingekoppelt

wurde und der Laserstrahl durch ein Objektiv in das Positioniervolumen der Maschine fokussiert wurde.

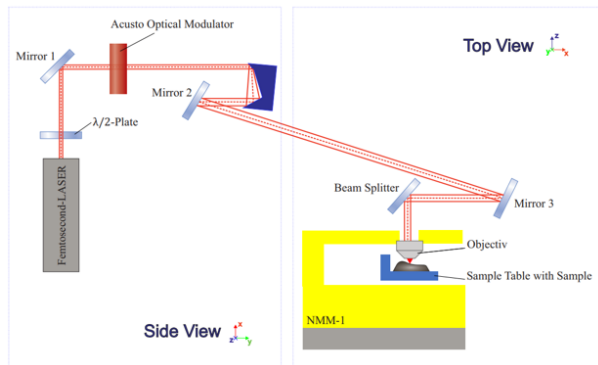


Fig. 2 Die vorliegende Grafik zeigt den Aufbau des direkten Laserschreibsystems auf einem optischen Tisch [3].

Das Herzstück des ursprünglichen Aufbaus war ein Femtosekundenlaser mit einer zentralen Wellenlänge von 804 nm. Die Ausgangsleistung lag bei über 150 mW und der Strahldurchmesser beträgt etwa 2 mm. Für den neuen Aufbau wurde ein neuer Femtosekundenlaser verwendet, der nun die Möglichkeit bietet, die Wellenlänge über einen variablen Bereich von 760 - 840 nm einzustellen. Die Ausgangsleistung beträgt über 170 mW und der Strahldurchmesser ist < 2 mm. Zusätzlich erfolgt eine interne Messung über eine Photodiode und ein Spektrometer. Somit sind mit dem neuen Femtosekundenlasersystem Untersuchungen für verschiedene Wellenlängen und eine bessere Beobachtung des Lasers möglich. Für die erste Umlenkung des Strahls wurde ein polarisierender Strahlteilerwürfel verwendet, um die Anpassung der Strahlintensität zu ermöglichen, wenn die Polarisationsrichtung mithilfe der $\frac{\lambda}{2}$ -Wellenplatte gedreht wurde. Dieser wurde nun vollständig durch einen Spiegel ersetzt, um den Glasweg zu reduzieren und Dispersion zu vermeiden. Die Strahlintensität wird nun vollständig durch den akusto-optischen Modulator geregelt. Er wurde zuvor als schneller Schalter integriert. Dazu wird die Eigenschaft des akusto-optischen Modulators (AOM) ausgenutzt, eine schnelle Modulation der ersten Beugungsordnung zu erzeugen, um damit eine geregelte Laserdosissteuerung für den Femtosekundenlaserstrahl zu realisieren. Das Herzstück der Modifikationen des Aufbaus ist der Einbau eines reflektierenden Strahlaufweilers. Er verdreifacht den Strahldurchmesser. Wichtig ist, dass die Spiegel ultraschnell-verstärkt und silberbeschichtet sind, um ihn für die hohen Energiepulse des Femtosekundenlasers geeignet zu

machen. Dadurch wird der Strahl des Femtosekundenlasers weit genug aufgeweitet, um die Linse des Objektivs vollständig zu beleuchten. Die numerische Apertur von 0,6 wird dabei voll ausgenutzt.

4 Stukturbreiten

Durch die weiteren Entwicklungen des direkten Laserschreibaufbaus, konnten deutliche Verringerungen in den Stukturbreiten erzeugt werden. Die Stukturbreiten können von der Belichtungs-dosis abhängen, aber auch von der Fokussierung des Laserstrahls. Da die Belichtungs-dosis direkt von der Bewegungsgeschwindigkeit abhängt, verringert sich die Breite der erzielten Linien mit der Geschwindigkeit. Durch das Anlegen verschiedener Geschwindigkeiten an den Proben-tisch, konnte schon vor den weiteren Entwicklungen die Linienbreite verändert werden [2]. Die Belichtungs-dosis kann aber auch durch akustisch-optische Modulation, das Anlegen einer Spannung an den eingebauten AOM, realisiert werden. Dies bietet für den jetzigen Aufbau auch die Möglichkeit der Laserdosis-Regelung. Die andere Möglichkeit, die Fokussierung des Laserstrahls, ist abhängig von der numerischen Apertur des verwendeten Objektivs. Das Objektiv, das den Laserstrahl auf den Resist fokussiert, hat einen Linsendurchmesser von 5mm. Dementsprechend konnte die numerische Apertur von 0,6 nicht voll ausgenutzt werden. Durch die Verwendung eines reflektiven Strahlaufweilers kann die numerische Apertur des Objektivs besser ausgenutzt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Verringerung der Linienbreite durch den Einsatz eines Strahlaufweilers möglich war. Betrachtet man die Ergebnisse, so wurden die Linienbreiten um etwa 17 Prozent reduziert [3].

References

- [1] L. Mohr-Weidenfeller, E. Manske, C. Reinhardt, and J. P. Bergmann, *Kombination von zweiphotonen-basiertem direktem Laserschreiben mit großflächiger und hochpräziser Nanopositionierung* (Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau, 2020).
- [2] L. Mohr-Weidenfeller, A.-V. Häcker, C. Reinhardt, and E. Manske, "Two-Photon Direct Laser Writing Beyond the Diffraction Limit Using the Nanopositioning and Nanomeasuring Machine," *Nanomanufacturing and Metrology* 4(3), 149–155 (2021).
- [3] A.-V. Häcker, L. Mohr-Weidenfeller, C. F. L. Stolzenberg, C. Reinhardt, and E. Manske, "Modifications to a High-Precision Direct Laser Writing Setup to Improve Its Laser Microfabrication," in *Laser-Based Micro- and Nanoprocessing XVI*, R. Kling and A. Watanabe, eds., p. 48 (SPIE, San Francisco, United States, 2022).