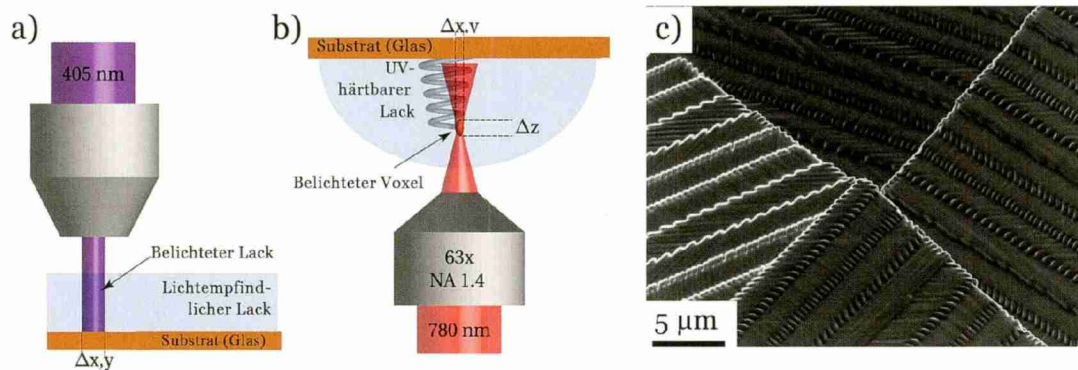


3-D-Mikro-Optiken mit ultraglaten Oberflächen

Neuartige additive Lithografie-Verfahren wie das Laserschreiben mit 2-Photonen-Polymerisation können Auflösungen deutlich unterhalb von einem Mikrometer erzeugen. Die Rauigkeiten sind oft noch viel zu hoch für mikrooptische Anwendungen. Mit einer nachträglichen berührungslosen Glättung auf unter 10 nm kann man vertretbare Schreibzeiten mit einer hohen optischen Güte verbinden.



2017 Wiley

Schema des direkten Laserschreibens (DLW) mit a) Belichtung entlang des Strahles; b) Belichtung in einem eng begrenzten Voxel. c) Beispiel einer mittels 2-Photonenlithografie hergestellten optischen Struktur. Aufgrund der verschiedenen Neigungen der 50µm grossen Facetten wird die systematische Rauigkeit deutlich, die durch das schichtweise Schreiben mit einem scharf begrenzten Strahlfokus verursacht wird.

Helmut Schiff, Paul Scherrer Institut

Optische Mikrolinsen werden heute vielfältig eingesetzt, zum Beispiel in Kameras und optischen Sensoren in Smartphones. Obwohl sie nur Dimensionen von wenigen Millimetern oder Bruchteilen davon haben, sind sie optisch nicht verschieden von denen grosser Kameras. Weil sie also ähnliche Formen wie jene Linsen haben, also mit konvexer oder konkaver Krümmung sind, aber nicht mechanisch bearbeitet werden können wie grössere Glaslinsen, müssen sie mittels neuer 3-D-Lithografie-Verfahren hergestellt werden. Und weil davon hunderte bis Millionen gebraucht werden, geht das nur über die Massenfertigung mittels Polymerabformung, also Prägen oder Spritzgiessen.

Hochgenaue Belichtung

Für die Herstellung des Masters, also der Urform des Formeinsatzes, muss so eine Linse oder ihr Negativ mit lithographischen Verfahren hergestellt werden, dem sogenannten Direct Laser Writing (DLW). Solche sind aktuell z. B. bei der Firma ams AG (Heptagon)

in Rüschlikon im Einsatz, sie basieren auf 1-Photonen-Absorption, bei der ein fokussierter Laserstrahl mit blauem Licht und variabler Intensität durch ein fotoempfindliches Material geführt wird und das belichtete Material durch eine Ätzlösung entfernt werden kann. Mit der Variation der Intensität des Lasers kann man diesen Ätzangriff steuern und eine 3-D-Kontur herstellen. Es wird dabei immer alles Material entlang der Achse des Lichtstrahls belichtet. Für Konturen mit extremer Auflösung und komplexen Strukturen reicht dies allerdings nicht aus. Hier bietet sich ein neues Verfahren an, das die sogenannte 2-Photonen-Polymerisation (2PP) benutzt, das in Karlsruhe von der Firma NanoScribe GmbH zur Serienreife entwickelt wurde. Mit diesem kann man gezielt nur den Bereich des Materials belichten, der im Fokus des Lichtstrahls ist.

Auf die Rauigkeit kommt es an

Nur wenn zwei Photonen gleichzeitig die Belichtung durchführen, also ihre Energie zum Belichten addieren, kann der Resist vernet-

zen und unlöslich werden. Das geschieht nur an Stellen des Strahles, in der die Intensität sehr hoch ist. Statt des ganzen Lichtstrahls wird also nur der Strahlfokus in Form eines «Voxels» (3-D-Pixel) belichtet. Physikalisch bedeutet dies, dass mit einem roten Laserstrahl (780 nm) ein Material belichtet werden kann, das bei blauem oder UV-Licht empfindlich ist (390 nm). Dadurch kann man die Linsen aus einzelnen Schichten aufbauen, wie bei den bekannten 3-D-Verfahren des Additive Manufacturing (AM). Nur dass die Schichten kleiner als ein Mikrometer dick sind und Auflösungen im Bereich deutlich unter einem Mikrometer (ca. 200 nm) möglich sind. Die Oberflächengüte, die bestimmt, wie gut das Licht durch die Linse fokussiert wird ohne viel Streulicht zu erzeugen, muss genau so gut wie die von grossen Linsen sein. Das ist in der Regel mit einer Rauigkeit definiert, die 100-fach kleiner ist als die Wellenlänge des Lichts, das durch die Linse übertragen wird. Bei sichtbarem Licht ist das also im Bereich 5 nm. Das ist selbst für gute Linsenschleifer eine grosse Herausforderung.

Lange Schreibzeiten

Nun bringen die modernen 3-D-Verfahren auf Basis eines 2PP-DLW den Nachteil mit sich, dass sie ein Material mit einem Schreibstrahl seriell beschreiben, also Linie für Linie, Schicht für Schicht. Wenn also so ein Strahl mäanderförmig durch ein flüssiges Material fährt, und das Material entlang des Weges des Fokus härtet, entstehen Strukturen, denen man danach die Schreibtrajektorien ansieht, selbst wenn diese stark überlappend geschrieben sind. Bei der 2PP-DLW ist der Schreibstrahl nur wenige 100 nm breit. Die hohe Auflösung bedingt, dass man viele Trajektorien schreiben muss, aber selbst dann sind die Rauigkeiten, die durch die verschiedenen Linien entstehen, im Bereich von 100 bis 200 nm. Da man den Vorteil der hohen Auflösung durch längere Schreibzeiten bezahlt, und da die Schreibgeschwindigkeit beschränkt ist, wäre eine extreme Überlappung, um diese Rauigkeit etwas auszugleichen, mit einer unzumutbaren Schreibzeit verbunden. Bei Testlinsen

mit ca. 2 mm Durchmesser, zusammengesetzt aus vielen kleinen konkaven Mikrolinsen, die in einem Projekt mit der Firma Heptagon erstellt wurden, wäre die Belichtung statt zwei Tagen drei Wochen lang gewesen. Das ist viel zu viel für ein Forschungsgerät, und es ist im Moment nicht absehbar, dass das Verfahren deutlich beschleunigt werden kann.

Präzise Oberflächenbehandlung

Deshalb haben die Forscher, statt die Schreibzeiten auf die Spitze zu treiben, einen anderen Weg gewählt: Sie schreiben eine Linse mit einer moderaten Überlappung und deshalb vertretbaren Zeit und glätten diese nachträglich. Dies ist möglich, wenn man die Oberfläche der Linse so verändert, dass sie bei höherer Temperatur viskos wird und fließen kann. Das nennt man tiefenselektives thermisches Aufschmelzen (Reflow). Dass dies funktioniert, haben die Forscher in den vergangenen Jahren den sogenannten TASTE-Prozess entwickelt. Denn bei Polymeren wie z. B. Polymethylmethacrylat (PMMA, als Plexiglas bekannt) kann man durch intensive UV-Strahlung die Oberfläche schädigen, was z. B. bei Vordächern zu der unerwünschten Mikrorissbildung und Vergilbung führt. Was bei Fensterscheiben von Nachteil ist, kann man bei Mikrolinsen vorteilhaft verwenden. Die Schädigung ist nämlich gleichbedeutend mit dem Kleinhacken der Polymerketten durch UV-Photonen. Kleinere Ketten haben einen erniedrigten Glasübergangspunkt, der bestimmt, bei welcher Temperatur das Material zu fließen beginnt.

Berührungslos polieren

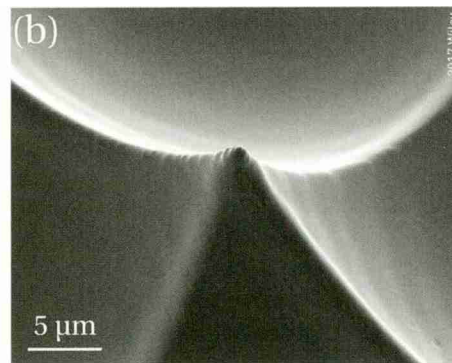
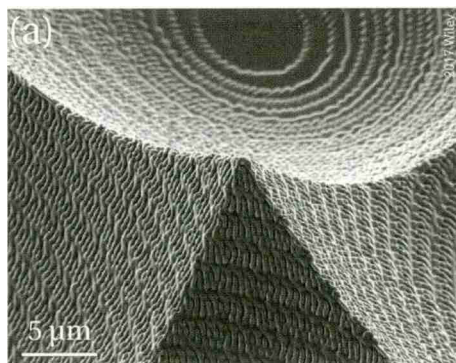
Wenn man steuern kann, wie tief das Material durch das UV-Licht angegriffen wird, kann man die Dicke der Schicht, die fließen soll, genau einstellen. Dies ist mit Hilfe von Vakuum UV-Licht (VUV) von 172 nm Wellenlänge gelungen, bei dem das PMMA nur bis zu einer Tiefe von ca. 400 nm geschädigt wird. Das ist vergleichbar mit Sonnenbaden, bei dem das höherenergetische UVC (kleinere Wellenlänge um die 250 nm) nicht so tief in

die Haut eindringt wie das sanftere UVA (ca. 350 nm), und deshalb eine Bräunung durch Pigmente in dem tieferen Hautgewebe stattfinden kann, währenddessen die gefährlicheren UVC-Strahlen schon in der Hornhaut blockiert werden. Da allerdings das Polymer, das die Techniker für die 2PP-DLW verwenden, keinen variablen Glasübergangspunkt aufweist, haben sie die Urform erst einmal durch Heissprägen in eine PMMA-Kopie überführt, dann mit VUV-Licht bestrahlt und in einem einfachen Heissprozess bei ca. 100 °C geglättet. Die Kopie wird dann, weil sie ohnehin in einen für die Massenfertigung geeigneten Formeinsatz überführt werden muss, nochmals in ein anderes, härteres Material kopiert. So konnten die Forscher die Rauigkeit von 200 nm auf unter 10 nm reduzieren, ohne dass die feinen Grate und Spitzen verschwunden sind oder die Struktur in sich zusammengefallen wäre. Denn das Material, das unterhalb der geschädigten Schicht liegt, hat noch seine ursprüngliche Glasübergangstemperatur, das bei dem verwendeten PMMA mit 128 °C ca. 30 °C höher liegt als das geschädigte Material. Bei Temperaturen um die 100 °C fließt deshalb nur die oberste Schicht und gleicht Rauigkeiten durch die Oberflächenspannung aus. So kann man berührungslos polieren, ohne

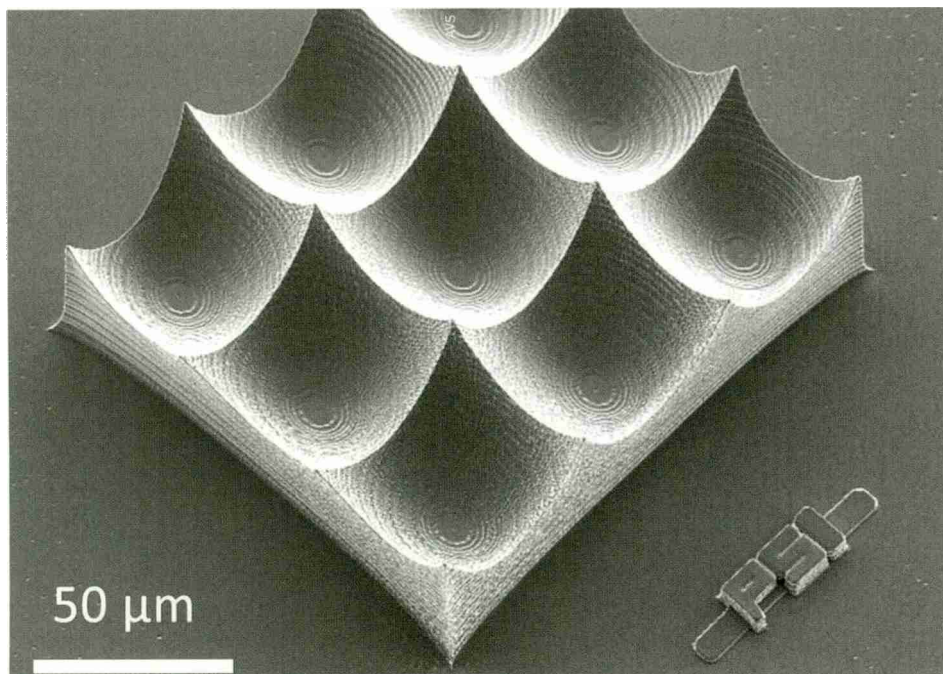
die Struktur zu beschädigen.

Auf dem Weg in die Industrie

Nun ist das Verfahren allerdings noch nicht reif für industrielle Anwendungen, sowohl die 3-D-Lithografie als auch das nachträgliche Glätten. Die 2PP-DLW wird aktuell an mehreren Stellen in der Schweiz hauptsächlich für Forschungszwecke eingesetzt. Dies nicht zuletzt, weil die Anforderungen an eine industrielle Anwendung (Formtreue, Probengröße, Kosteneffizienz) oft noch nicht ausreichend sind, und sich vertretbare Schreibzeiten oft nur mit Abstrichen in einem anderen Gebiet erkaufen lassen. Weiterhin wollen die Forscher das Glättungsverfahren noch für andere Strukturen und Materialien testen, sodass Fertigungstoleranzen eingehalten und die Flexibilität erhöht werden können. Im Rahmen des vom Swiss Nanoscience Institut (SNI) finanzierten Projekts (SurfFlow) haben sie zusammen mit der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) demonstriert, dass man mit material- und verfahrenstechnischem Know-how schon jetzt Lösungen für Verfahren erzielen kann, die vielleicht in ein paar Jahren zu Standardlösungen für die additive Massenfertigung von Mikroprodukten werden können. ●



Raue und geglättete Struktur. Die Rauigkeit von 200 nm wurde durch Bestrahlen mit 172-nm-VUV-Licht und anschließendem thermischen Reflow auf unter 10 nm reduziert.



Beispielstruktur, bestehend aus einer Anordnung von 50 μm grossen Mikrolinsen mit 40 μm konkaven Vertiefungen. Zwischen den einzelnen Linsen sind scharfe Grate mit 1- μm -Spitzen, die beim Glätten nicht beschädigt werden dürfen. Die Struktur aus 3x3-Linsen ist nur ein kleiner Ausschnitt der grossen Linse mit 2 μm Durchmesser, die 48 Stunden zum Schreiben braucht.