

Micro-optique 3D avec surfaces ultra-lisses

De nouveaux procédés de lithographie additifs tels que l'écriture laser par polymérisation 2-photon peuvent produire des résolutions bien en dessous du micromètre. La rugosité est souvent encore beaucoup trop élevée pour des applications micro-optiques. Le lissage ultérieur sans contact jusqu'à moins de 10 nm peut être combiné avec des temps d'écriture acceptables et une haute qualité optique.

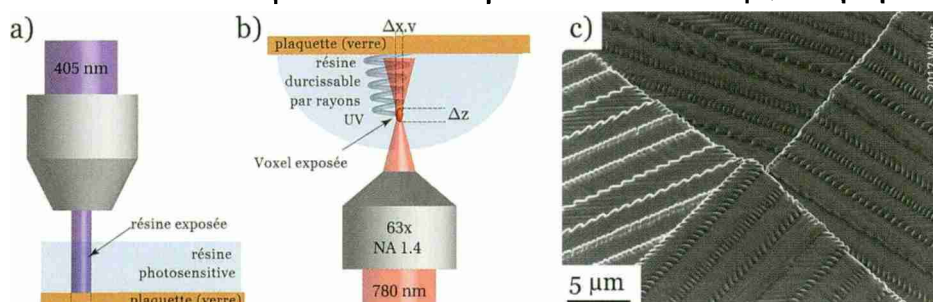


Figure 1 : Schéma d'écriture laser directe (Direct Laser Writing – DLW) avec a) irradiation le long du faisceau; b) irradiation dans un voxel étroitement limité. c) Exemple d'une structure optique obtenue par lithographie à 2-photon. En raison des différentes inclinaisons des facettes de 50 μm , la rugosité systématique causée par l'écriture en couches avec une focalisation de faisceau fortement limitée devient claire.

Aujourd'hui, les microlentilles optiques sont utilisées dans une grande variété d'applications, par exemple dans les caméras et les capteurs optiques des smartphones. Bien qu'elles ne mesurent que quelques millimètres ou fractions de millimètres, elles ne sont optiquement pas différentes de celles des grosses caméras. Parce qu'elles ont des formes similaires à ces lentilles, c'est-à-dire avec une courbure convexe ou concave, mais qu'elles ne peuvent pas être usinées mécaniquement comme des lentilles de verre plus grandes, elles doivent être produites en utilisant de nouvelles techniques de lithographie 3D. Et parce que des centaines, voire des millions d'entre elles sont nécessaires, cela ne peut être réalisé qu'avec un moyen de production de masse par moulage de polymère, c'est-à-dire par « impression » ou moulage par injection. Pour la production du master, c'est-à-dire la forme originale de l'insert du moule, une telle lentille ou son négatif doit être produite par des procédés lithographiques, ce qu'on appelle communément l'écriture laser directe (Direct Laser Writing - DLW). Celles-ci sont actuellement utilisées, par exemple, chez ams AG (Heptagon) à Rüschiikon. Elles sont basées sur une absorption à 1-photon, dans laquelle un fais-

ceau laser focalisé avec une lumière bleue et une intensité variable est guidé à travers un matériau photosensible et le matériau irradié peut être retiré par une solution d'attaque (Figure 1a).

Contrôler l'attaque et créer un contour 3D

En variant l'intensité du laser, vous pouvez contrôler cette attaque et créer un contour 3D. Dans tous les cas, tout le matériau se trouvant le long de l'axe du faisceau lumineux est irradié. Cependant, cela ne suffit pas pour des contours avec une résolution extrême et des structures complexes. Ici, un nouveau procédé, connu sous le nom de polymérisation à 2-photon (2PP), a été développé par NanoScribe GmbH à Karlsruhe pour la production en série. Avec celui-ci, on ne peut irradier que la zone du matériau qui est au centre du faisceau lumineux. Ce n'est que si deux photons réalisent l'irradiation en même temps, c'est-à-dire que leur énergie s'additionne durant l'irradiation, que la résine peut réticuler et devenir insoluble. Cela se produit seulement aux endroits du faisceau où l'intensité est très élevée. Au lieu de l'ensemble du faisceau lumineux, seule la focale du faisceau est irradiée sous la forme d'un « voxel » (pixels 3D) (Figure 1b).

Physiquement, cela signifie qu'un faisceau laser rouge (780 nm) peut irradier un matériau sensible à la lumière bleue ou UV (390 nm). Les lentilles peuvent ainsi être construites à partir de couches individuelles, comme dans les procédés 3D bien connus de la fabrication additive (AM). Seulement, les couches sont plus petites qu'un micromètre d'épaisseur et les résolutions sont bien en dessous d'un micromètre (environ 200 nm). La qualité de surface, qui détermine la façon dont la lumière est focalisée à travers la lentille sans produire beaucoup de lumière diffusée, doit être aussi bonne que les grandes lentilles. Ceci est généralement défini par une rugosité 100 fois plus petite que la longueur d'onde de la lumière transmise par la lentille. Dans le cas de la lumière visible, elle se situe donc aux alentours de 5 nm.

Un grand défi

C'est déjà un grand défi, même pour les bonnes meuleuses de lentille. Cependant, les méthodes 3D modernes basées sur une 2PP-DLW ont l'inconvénient d'écrire en série un matériau avec un faisceau, c'est-à-dire ligne par ligne, couche par couche. Ainsi, lorsqu'un tel faisceau serpente à travers un matériau liquide et que le matériau durcit le long de la trajectoire de la focale, des structures sont créées qui sont ensuite visible de par les trajectoires du faisceau, même si elles sont écrites de manière fortement chevauchante (Figure 1c). Avec le procédé 2PP-DLW, le faisceau n'a qu'une largeur de quelques centaines de nanomètres. La haute résolution signifie que de nombreuses trajectoires doivent être écrites, même si les rugosités causées par les différentes lignes sont de l'ordre de 100 à 200 nm. Étant donné que l'avantage de la haute résolution est payé par des temps d'écriture plus longs et que la vitesse d'écriture est limitée, un chevauchement extrême pour compenser cette rugosité serait associé à un temps d'écriture déraisonnable. Pour nos lentilles de test d'un diamètre d'environ 2 mm, composées de nombreuses petites microlentilles concaves, que nous avons créées dans un projet avec Heptagon, l'irradiation aurait été de trois semaines au lieu de deux

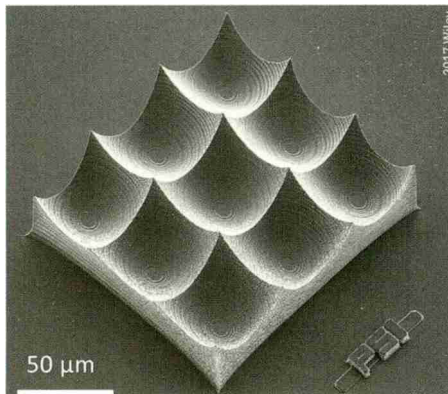


Figure 2 : Exemple de structure constituée d'un réseau de microlentilles de 50 µm avec des creux concaves de 40 µm. Entre les lentilles individuelles, il y a des bavures tranchantes avec des pointes de 1 µm qui ne doivent pas être endommagées lors du lissage. La structure 3x3 de la lentille n'est qu'une petite partie de la lentille de 2 mm de diamètre, qui prend 48 heures à écrire.

jours (Figure 2). C'est beaucoup trop pour un instrument de recherche, et il n'est pas prévisible pour le moment que la procédure puisse être considérablement accélérée.

Autre voie : chevauchement modéré

C'est pourquoi, au lieu de repousser les délais d'écriture à la limite, nous avons choisi une autre voie. Nous écrivons une lentille avec un chevauchement modéré et donc un temps justifiable, puis nous la lissons. Ceci est possible si seule la surface de la lentille est modifiée de manière à ce qu'elle devienne visqueuse et puisse s'écouler à des températures plus élevées. C'est ce qu'on appelle la fusion thermique sélective en profondeur (Reflow). Pour que cela fonctionne, nous avons fait des recherches au cours des dernières années et nous avons développé ce qu'on appelle le procédé TASTE [1,2]. Dans le cas de polymères tels que, par exemple, le poly (méthacrylate de méthyle, PMMA, connu sous le nom de plexiglas), un rayonnement UV intense peut endommager la surface, ce qui entraîne des microfissures indésirables et le jaunissement des auvents. Ce qui est un inconvénient avec les vitres de fenêtre peut être utilisé de manière avantageuse

pour les microlentilles. Les dommages équivalant au hachage des chaînes de polymères par les photons UV. Les chaînes plus petites ont un point de transition vitreuse inférieur T_g , ce qui détermine la température à laquelle le matériau commence à s'écouler. Si vous pouvez également contrôler à quelle profondeur le matériau est affecté par la lumière UV, vous pouvez ajuster l'épaisseur de la couche qui doit s'écouler. Nous y sommes parvenus avec l'aide de la lumière UV sous vide (VUV) à une longueur d'onde de 172 nm.

Un peu comme le bain de soleil

Sous ces conditions, le PMMA est endommagé jusqu'à une profondeur d'environ 400 nm. C'est un peu comme le bain de soleil, où la plus haute énergie UVC (plus petite longueur d'onde aux alentours de 250 nm) ne pénètre pas aussi profondément dans la peau qu'à plus faible énergie UVA (env. 350 nm). Donc, un bronzage par pigments peut avoir lieu dans les tissus cutanés plus profonds, alors que les rayons UVC plus dangereux sont déjà bloqués

dans la couche cornée. Cependant, comme le polymère que nous utilisons pour la 2PP-DLW n'a pas la propriété T_g variable, nous avons d'abord transféré la forme originale en copie PMMA au moyen de l'estampage à chaud, puis irradié avec de la lumière VUV et lissé par un simple procédé à chaud à environ 100° C. La copie est ensuite à nouveau copiée dans un autre matériau plus dur, car elle doit de toute façon être transférée dans un insert de moule adapté à la production en série. Par ce procédé, nous avons pu réduire la rugosité de 200 nm à moins de 10 nm sans que les petites bavures et pointes disparaissent ou que la structure s'affaisse (Figure 3). En effet, le matériau qui se trouve sous la couche endommagée a toujours sa température de transition vitreuse d'origine, qui est environ 30 °C plus élevée que le matériau endommagé à 128 °C pour le PMMA que nous utilisons. Par conséquent, à des températures aux alentours de 100 °C, seule la couche supérieure s'écoule et compense la rugosité due à la tension superficielle. Ceci nous permet de polir sans contact, sans endommager la structure [3].

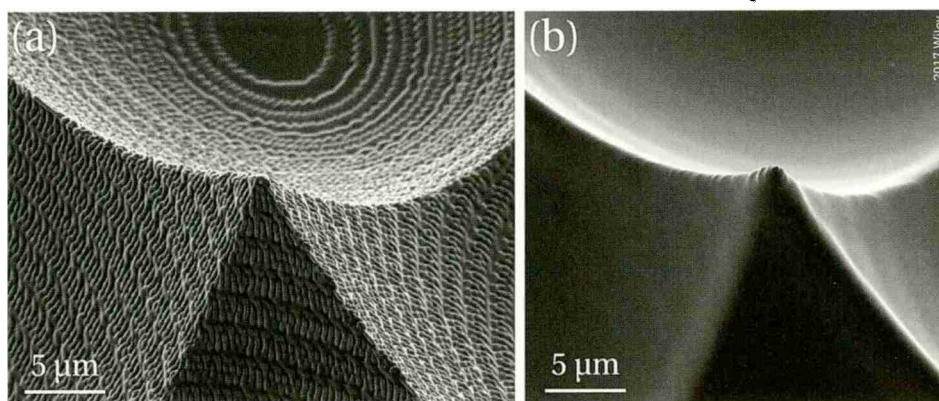


Figure 3 : Structure rugueuse et lisse. La rugosité de 200 nm a été réduite à moins de 10 nm par irradiation avec une lumière VUV de 172 nm et un Reflow thermique subséquent.

Par ce procédé, il a été possible de réduire la rugosité de 200 nm à moins de 10 nm sans que les petites bavures et pointes ne disparaissent ou que la structure ne s'affaisse

Pas encore prêt pour des applications industrielles

Néanmoins, le procédé n'est pas encore prêt pour des applications industrielles, tant pour la lithographie 3D que pour le lissage ultérieur. Actuellement, la 2PP-DLW est principalement utilisée à des fins de recherche sur plusieurs sites en Suisse. Cela est d'autant plus vrai que les exigences pour une application industrielle (précision de forme, taille de l'échantillon, rentabilité) ne sont souvent pas encore suffisantes, et comme nous l'avons montré dans notre exemple, les délais d'écriture sont souvent trop onéreux et ne peuvent être raisonnables qu'avec une réduction dans un autre domaine. En outre, nous voulons aussi tester le procédé de lissage pour d'autres structures et matériaux afin de maintenir les tolérances de production et d'augmenter la flexibilité. Dans le cadre du projet SurfFlow financé par le Swiss Nanoscience Institut (SNI), nous avons démontré qu'avec un savoir-faire en matériaux

et des procédés, il est déjà possible de trouver des solutions qui pourraient, dans quelques années, devenir des solutions standards pour la production en série par fabrication additive de micro-produits. Nous sommes donc confiants dans le fait de pouvoir bientôt transformer le procédé TASTE en un produit. ●

Helmut Schiff

Institut Paul Scherrer (PSI)

Groupement professionnel
 Additive Manufacturing
 Swiss Engineering

► www.psi.ch

► Le GP Additive Manufacturing de Swiss Engineering organise le 30 mai à l'Addipole de Saint-Croix le séminaire « 5 à 7 Reverse engineering » avec Nikon et Craform

Références

- [1] – A. Schleunitz, V.A. Guzenko, M. Messerschmidt, H. Atasoy, R. Kirchner, and H. Schiff, « Novel 3D micro- and nanofabrication method using thermally activated selective topography equilibration (TASTE) of polymers », Nano Convergence 1:7 [2014]
- [2] – H. Schiff, « Nanoimprint lithography: 2D or not 2D? A review », Applied Physics A 121[2] [2015] 415-435
- [3] – N. Chidambaram, R. Kirchner, R. Fallica, L. Yu, M. Altana, and H. Schiff, « Selective surface smoothening of polymer microlenses by depth confined softening », Adv. Mater. Technol. [2017] 1'700'018