

# Écriture directe de microstructures à 2 et 3 dimensions par un phototraceur massivement parallèle utilisant un micro-écran comme masque reconfigurable

M. M. Kessels et K. Heggarty

27 septembre 2006

GET/ENST Bretagne  
Technopôle Brest Iroise  
CS 83818

29238 Brest Cedex 3 (France)

Téléphone : +33(0)229001031 – Fax : +33(0)229001025

[Melanie.Kessels@enst-bretagne.fr](mailto:Melanie.Kessels@enst-bretagne.fr)

[Kevin.Heggarty@enst-bretagne.fr](mailto:Kevin.Heggarty@enst-bretagne.fr)

## Résumé

Un phototraceur innovant à écriture massivement parallèle, basé sur un photorépéteur photolithographique standard, a été mis au point à l'ENST Bretagne. Un écran LCD remplace le réticule traditionnel. L'image affichée sur ce modulateur spatial est directement projetée dans la photorésine. Un contrôle précis de l'exposition est possible grâce à la modification en temps réel de cette image. Des microstructures à 2 et 3 dimensions, dont les plus petits éléments sont de l'ordre du micromètre, sont fabriquées avec succès grâce au système de projection de grande qualité du photorépéteur. La vitesse de traçage est de quelques cm<sup>2</sup> par minute. Le faible coût et la rapidité de production font de ce prototype un concurrent aux méthodes photolithographiques classiques pour le prototypage et la fabrication de petites séries. La résolution du système actuel est limitée par la longueur d'onde de travail (436 nm), dans une nouvelle version, nous remplacerons l'écran LCD par un écran à micromiroirs (DMD) et nous utiliserons une source lumineuse de longueur d'onde comprise entre 300 et 400 nm, ce qui devrait nous permettre d'atteindre à terme des résolutions en dessous de 500 nm. Nous présenterons le phototraceur actuel et les derniers résultats obtenus avec le phototraceur à DMD.

## 1. Introduction

La lithographie par projection optique est une technique de gravure photochimique où une information est gravée dans une fine couche de matériau photosensible posée sur un substrat. Ces dernières années, la recherche dans le domaine de la lithographie s'est notamment intéressée à la fabrication de microstructures à 3 dimensions car il existe un grand nombre de domaines d'application ayant recours à la qualité élevée des techniques lithographiques : la micro-optique, la nanotechnologie, l'industrie des semi-conducteurs, ...

Ces microstructures à 3 dimensions sont généralement fabriquées à l'aide de techniques photolithographiques standards utilisant soit plusieurs masques binaires standards<sup>1</sup>, soit un masque codé par différents niveaux de gris<sup>2</sup>, soit par écriture directe (rayon X<sup>3</sup>, faisceau laser<sup>4</sup>, d'électrons<sup>5,6</sup> ou d'ions<sup>7</sup>). Ces techniques permettent d'obtenir des

---

<sup>1</sup> H. P. Herzig, *Micro-Optics: Elements, systems and applications*, Taylor & Francis, Cornwall (1997)

<sup>2</sup> N. Dumbravescu, *Materials Science in Semiconductor Processing*, **3**, 569-573 (2000)

<sup>3</sup> N. Matsuzuka, Y. Hirai, and O. Tabata, *17<sup>th</sup> IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, **4485**, 681-684 (2004)

<sup>4</sup> H. Yu, B. Li, and X. Zhang, *Sensors and Actuators A : Physical*, **125**, 553-564 (2006)

microstructures d'une très haute résolution. Les deux premières méthodes permettent la production de masse à des coûts avantageux. Toutefois la fabrication du masque étant très chère, elles ne sont pas utilisées pour le prototypage où l'on emploiera plutôt les dernières techniques citées. En effet celles-ci sont nettement plus rapides pour produire un petit nombre de microstructures.

Récemment de nouvelles techniques photolithographiques ont été proposées où des masques reconfigurables remplacent les photomasques classiques<sup>8,9,10</sup>. Ces masques reconfigurables en temps réel sont habituellement des écrans à cristaux liquides (LCD) ou à micromiroirs (DMD), utilisés comme modulateur spatial de la lumière, *spatial light modulator* (SLM). Ces techniques profitent à la fois des avantages d'un écran programmable ainsi que de ceux d'un système de projection photolithographique. La forme des microstructures 3D peut être ajustée rapidement puisque aucun masque n'est nécessaire, seuls les fichiers de données sont générés pour être ensuite affichés à l'écran.

Ces phototraceurs offrent un gain de rapidité pour un coût de production avantageux. En effet, environ un demi million, voire plus, de faisceaux modulés correspondant aux pixels du modulateur illumine simultanément la photorésine, d'où la dénomination *massivement parallèle*. Ces milliers de faisceaux offrent un double avantage : une diminution de la durée de fabrication et du coût de production.

Au département optique de l'ENST Bretagne, un phototraceur innovant à écriture massivement parallèle, basé sur le principe d'un photorépéteur lithographique standard, a été mis au point. Un écran LCD remplace le réticule traditionnel. Notre système, par rapport aux techniques décrites ci-dessus où le phototraceur est construit de a à z, a les avantages du photorépéteur lithographique standard professionnel de haute performance existant : une optique de réduction, un autofocus, des platines mobiles, etc., de très haute qualité. De plus, il peut toujours être employé de deux façons : comme photorépéteur et comme phototraceur. Il suffit de placer un réticule ou l'écran LCD selon l'emploi souhaité du prototype. Notre système est donc polyvalent et aussi bien adapté au prototypage qu'à la production en grandes séries.

## 2. Phototraceur massivement parallèle

### 2.1 Principe de base du phototraceur massivement parallèle

Le phototraceur parallèle est essentiellement constitué d'un SLM, d'un objectif de projection et de platines XY. Le schéma du principe de base du phototraceur est montré sur la figure 1A. Une source lumineuse illumine le SLM et la figure affichée sur ce dernier est projetée sur le substrat par des lentilles de réduction. Une fois la première image insolée, l'illumination est interrompue, les platines XY se déplacent, puis l'image suivante s'affiche sur le SLM, l'illumination est restaurée, et ainsi de suite jusqu'à ce que toute l'image soit insolée.

---

<sup>5</sup> M. Ekberg, F. Nikolajeff, M. Larsson, and S. Hard, *Appl. Opt.*, **33**, 103-107 (1994)

<sup>6</sup> L. Grella, E. Di Fabrizio, M. Gentili, M. Baciocchi, and R. Maggiora, *Microelectron. Eng.*, **35**, 495-498 (1997)

<sup>7</sup> B. Volckaerts, H. Ottevaere, A. Vila, M. Muruzabal, C. Dabaes, P. Vynck, P. Tuteleers, V. Baukens, A. Hermanne, I. Veretennicoff, and H. Thienpont, *IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS*, 103-104 (2000)

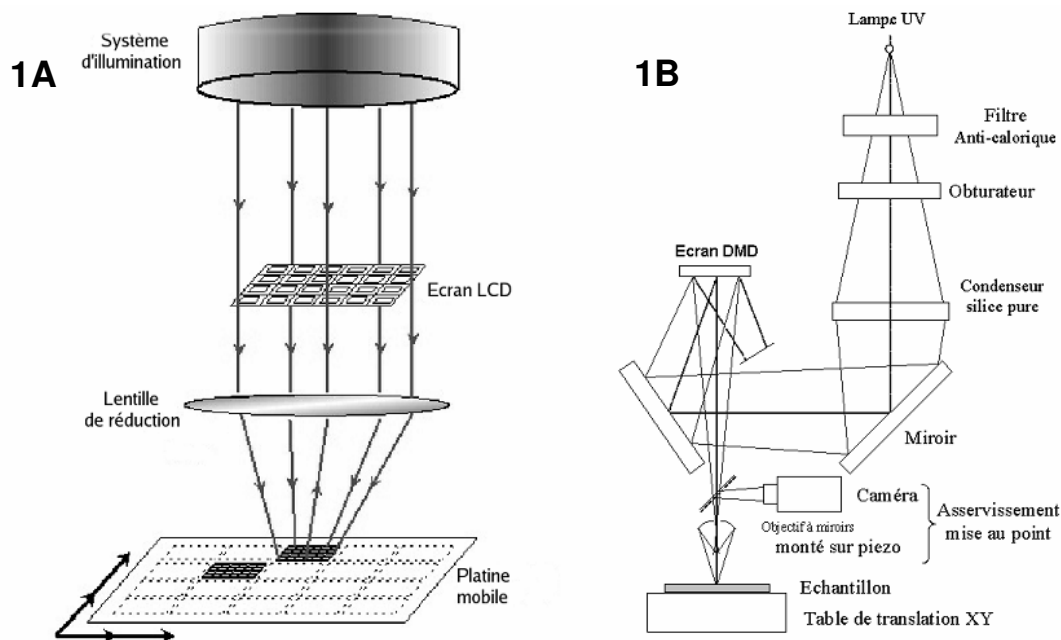
<sup>8</sup> Q. Peng, S. Liu, Y. Guo, B. Chen, J. Du, and Y. Zeng, *Opt. Eng.*, **42**, 477-481 (2003)

<sup>9</sup> Y. Gao, T. Sheng, J. Chen, N. Luo, X. Qi, and Q. Jin, *Optik*, **116**, 303-310 (2005)

<sup>10</sup> L. Chi, G. Xiaowei, G. Fuhua, L. Boliang, D. Xi, D. Jinglei, and Q. Chuankai, *Proc. SPIE*, **5645**, 307-314 (2005)

## 2.2 Design du système

Le phototraceur parallèle a été construit à partir d'un photorépéteur GCA 4800DSW possédant une lentille de réduction d'un facteur 5. Une lampe à vapeur de mercure éclaire la totalité de l'écran LCD (figure 1A). La lumière passant au travers de l'écran LCD se divise en une série de faisceaux, en nombre égal à celui des pixels de l'écran LCD, tous parallèles entre eux. L'image, affichée sur l'écran, est projetée sur une fine couche de photorésine positive *Shibley 1813* posée sur un substrat. Ce dernier est placé sur une platine mobile (figure 1A) dont le déplacement peut couvrir une surface d'environ 15x15 cm<sup>2</sup>. Une fois l'étape d'insolation terminée, le support photosensible est développé avec le *MICROPROSIT 303* afin de révéler l'image finale obtenue.



**Figure 1** : Principe des phototraceurs de l'ENST Bretagne. Un système d'illumination éclaire l'écran LCD/DMD. Une lentille réduit d'un facteur 5 l'image projetée sur un substrat, recouvert de photorésine, posé sur une platine mobile. **A.** Photorépéteur lithographique standard où un écran LCD transmissif remplace le masque traditionnel. **B.** L'écran DMD étant réfléchif, l'optique du nouveau prototype a dû être adaptée.

## 2.3 Système d'illumination

Le système d'illumination est un composant très important dans tout système photolithographique. La puissance de la source lumineuse de ce prototype est de 7,5 mW/cm<sup>2</sup> sur un réticule d'une surface de 10x10 cm<sup>2</sup> avec un degré d'uniformité de  $\pm 1\%$  sur celle-ci. La longueur d'onde d'illumination de travail est 436 nm (raie g), longueur d'onde à laquelle la photorésine *Shibley 1813* utilisée est la plus sensible. Travailler avec des longueurs d'onde inférieure à 400 nm est problématique car les cristaux liquides du SLM sont endommagés. Comme la lampe à vapeur de mercure ne peut être directement modulée, un obturateur électro-mécanique est utilisé pour illuminer le SLM uniquement lorsqu'une image valide y est affichée.

## 2.4 L'écran LCD

Les technologies de fabrication d'écran LCD s'étant bien développée au cours de ces dernières années, les écrans de haute précision et de haute résolution sont devenus des

composants standards, peu onéreux. Actuellement l'écran LCD de chez TL Electronic GmbH<sup>11</sup> est constitué d'une matrice active de 800x600 pixels. Il est monté sur un support adapté placé sur le haut de la colonne de réduction avec un polariseur de telle sorte que le plan des cristaux liquides soit dans le plan optique du réticule photolithographique standard. Le pas du pixel carré est de 33  $\mu\text{m}$  avec une surface rectangulaire transparente au centre. L'écran est monochrome. Les images bitmap affichées sur celui-ci sont codées en 8 bits, ce qui correspond théoriquement à 256 niveaux de gris.

La vitesse de rafraîchissement de l'écran limite actuellement la vitesse de traçage. Cette limite d'affichage est de 20 ms entre deux images successives. Dans le cas de notre phototraceur, cette limite n'est pas critique puisque le demi-million de faisceaux utilisé permet un gain substantiel de rapidité de traçage.

## 2.5 Colonne de réduction

La lentille de réduction, hautement optimisée, constitue le noyau du système de projection. La qualité d'imagerie de cette dernière influence directement les éléments caractéristiques de la structure dans la photorésine. C'est une lentille ZEISS 5x avec une ouverture numérique de 0,30 donnant une résolution d'un micron sur un champ potentiel d'écriture de 16x16 mm<sup>2</sup> avec une distorsion inférieure à 80 nm. On obtient ainsi dans la photorésine l'image résolue de la zone centrale transparente des pixels du SLM ainsi que la zone opaque située entre les pixels. La zone centrale transparente du pixel au niveau de la photorésine est approximativement de la taille de 5x3  $\mu\text{m}^2$  avec un pas de 6,6  $\mu\text{m}$ .

## 2.6 L'électronique et le logiciel de phototraçage

Comme le photorépéteur GCA date des années 90, le logiciel d'origine et le hardware (PDP11) sont aujourd'hui obsolètes. Pour cette raison, nous avons complètement modifié le logiciel de traçage tout en gardant les interfaces électroniques existantes, indispensables au contrôle de l'électronique originelle. Le nouveau logiciel contrôle et synchronise l'affichage de l'image sur le SLM avec les platines mobiles, le système de détection de la position, l'autofocus et l'obturateur. Le phototraceur doit être capable de travailler avec les différents formats de fichier couramment employés en industries. Un logiciel permet de convertir les formats vectoriels (Gerber, GDSII, DXF, ...) en format RLE (Run Length Encoded) qui peut être lu et affiché par le PC. Ensuite elles sont traitées par le logiciel d'affichage. De cette manière, le phototraceur peut tracer des images binaires, des images à niveaux de gris de format (PGM, TIF, PCX, ...), ainsi que des images binaires de format vectoriel, après conversion.

## 2.7 Affichage des images

Lors de l'affichage des images, différentes techniques seront employées : le traçage en blocs qui tient compte des images dont la taille est supérieure à celle du SLM, une « super résolution » qui comble la zone opaque présente entre les pixels du SLM, un « *step and repeat* » qui permet de reproduire plusieurs fois une même structure et le multiniveau qui permet de réaliser des structures 3D.

La technique de **traçage de blocs** consiste à découper en blocs de la taille de l'écran à cristaux liquides une image à insoler de grandeur supérieure à celle de l'écran. Chaque bloc

---

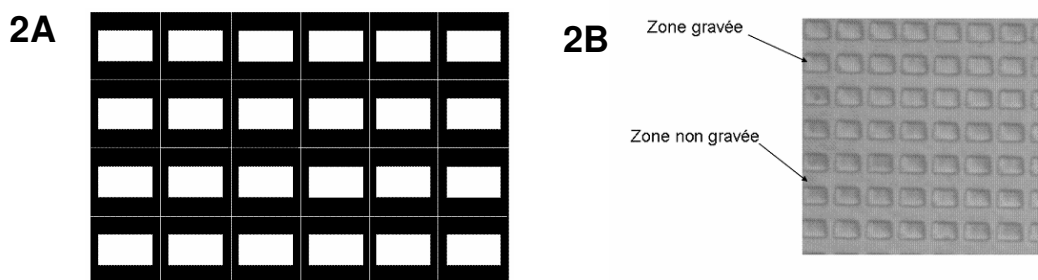
<sup>11</sup> TL Electronic GmbH, München, 7 Gutenbergsstr., 85248 Garchin-Hochbrück bei München Germany.  
<http://www.tl-electronic.de>

de l'image sera gravé juste à côté du bloc précédent, reconstituant ainsi l'image souhaitée dans la photorésine.

Entre deux pixels de l'écran LCD est présente une zone opaque correspondant au circuit de commande (figure 2A). Cet espace, de l'ordre de  $1\ \mu\text{m}$  après réduction, laisse des zones non gravées dans la photorésine (figure 2B). Notre technique de *super résolution* permet de combler l'espace non insolé en effectuant un léger déplacement (inférieur à la taille du pixel, mais de dimension proche de l'espace inter-pixels) du substrat entre chaque exposition.

Afin de réduire la taille des fichiers, lorsqu'une structure est constituée de plusieurs images identiques, ces images sont répétées en utilisant la technique de *step and repeat*. L'image est insolée une première fois, les platines se déplacent, l'image est répliquée, et ainsi de suite.

Pour réaliser une structure 3D dans la photorésine, la technique de *multiniveau* est appliquée. L'image de la structure 3D est affichée à l'écran avec différents niveaux de gris. Chaque niveau de gris correspond à un niveau de profondeur à graver dans la photorésine. Une région éclairée par un gris foncé sera moins profondément gravée qu'une région éclairée par un niveau de gris plus clair. L'image à niveau de gris est décomposée en une série d'images binaires, correspondant aux différents niveaux de gris. Ces images binaires seront insolées pendant une durée déterminée, gravant des couches de différentes profondeurs dans la photorésine.



**Figure 2 :** **A.** Représentation schématique d'un écran LCD de 24 pixels, tous illuminés, c'est-à-dire que l'on affiche un écran blanc. **B.** Image gravée dans la photorésine, correspondant à un écran LCD où tous les pixels sont illuminés.

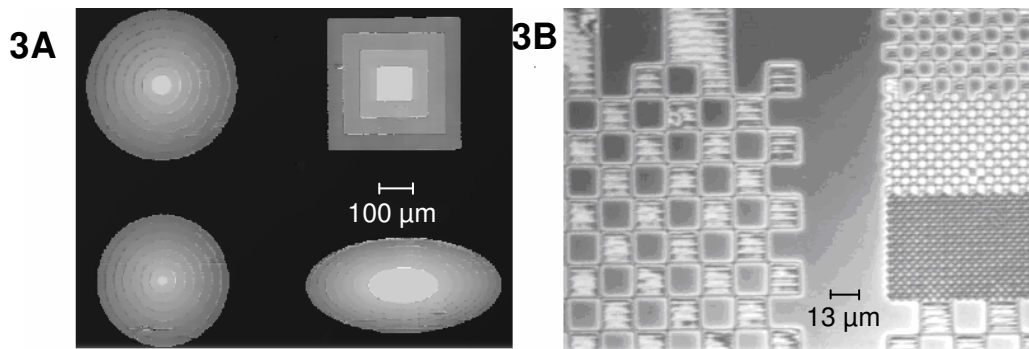
### 3. Résultats

Quelques exemples de structures 3D fabriquées par le phototraceur LCD sont montrés sur la figure 3A. Elles ont été gravées simultanément dans la photorésine. Le niveau de gris code la profondeur de gravure.

### 4. Perspectives : améliorer la résolution

Ce prototype a été conçu pour tracer des structures avec une résolution de l'ordre de quelques microns, limite imposée par l'optique de projection. La longueur d'onde de traçage actuelle est  $436\ \text{nm}$ . Or il existe de nombreuses applications pour un phototraceur de ce type avec une résolution sub-micronique.

Afin d'optimiser la résolution du prototype existant, nous réalisons actuellement un nouveau prototype fondé sur le même principe où l'écran LCD, dont les cristaux liquides sont endommagés par un éclairage ultra-violet (UV), est remplacé par une matrice réfléchissante de micromiroirs, *Digital Micromirror Device (DMD)*, commercialisée par Texas Instruments (TI). Nous pouvons dès lors travailler avec des longueurs d'onde inférieures à  $400\ \text{nm}$ , ce qui



**Figure 3 :** Vues prises par un microscope interférométrique de microstructures tests gravées dans la photorésine. **A.** Microstructures 3D gravées simultanément dans la photorésine par le prototype utilisant l'écran LCD. Le niveau de gris code la profondeur de gravure. **B.** Microstructures obtenues avec le prototype utilisant les DMD.

nous offre 2 avantages : l'augmentation de la résolution des microstructures ainsi que la possibilité d'utiliser d'autres matériaux photosensibles à ces longueurs d'onde sub-microniques. Nous espérons, par exemple, réaliser par écriture directe des guides optiques.

L'écran DMD est constitué d'une matrice active de 1024x768 micromiroirs. La taille des micromiroirs carrés est de 13,68  $\mu\text{m}$  avec un taux de remplissage optique de 85%, ce qui réduit la zone opaque. Toutefois la technique de super résolution sera toujours employée après avoir été adaptée aux nouvelles dimensions de l'écran. Le rafraîchissement de l'écran s'effectue à une fréquence de 100 Hz.

Les micromiroirs ont trois positions possibles : *on*, *off* et *float*. Dans les deux premiers cas, la lumière est réfléchi(e) (*on*) ou non (*off*) vers le substrat. La troisième position correspond à une position de repos : la tension est coupée sous chaque micromiroir. Les positions *on* et *off* sont des positions d'inclinaison des micromiroirs de plus ou moins 12°, ce qui complique leur éclairage. En effet, il a fallu adapter le système d'illumination pour éclairer l'écran sous un angle de 12°. Pour y parvenir, nous avons réalisé un nouveau prototype (figure 1B).

La figure 3B montre un exemple de microstructures fabriquées avec le nouveau prototype. Avec ce nouvel écran DMD, notre objectif est d'atteindre à terme une résolution de l'ordre de 500 nm (Projets régional PRINT et européen NEWTON).

## Remerciements

Ce projet de recherche a été principalement financé par le projet européen DRAWMAP de type CRAFT.