



HAL
open science

Étude des applications des micro-afficheurs pour le phototraçage massivement parallèle de structures submicroniques

Charbel Nassour

► **To cite this version:**

Charbel Nassour. Étude des applications des micro-afficheurs pour le phototraçage massivement parallèle de structures submicroniques. Optique / photonique. Télécom Bretagne, Université de Bretagne-Sud, 2012. Français. NNT : . tel-00719635

HAL Id: tel-00719635

<https://theses.hal.science/tel-00719635v1>

Submitted on 20 Jul 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne

Télécom Bretagne

En habilitation conjointe avec l'Université de Bretagne Sud

Ecole Doctorale - sicma

Étude des applications des micro-afficheurs pour le phototraçage massivement parallèle de structures submicroniques

Thèse de Doctorat

Mention : Sciences de l'ingénieur

Présentée par **Charbel NASSOUR**

Département : Optique

Directeur de thèse : Jean-Louis de Bougrenet de la Tocnaye

Soutenu le 5 mars 2012

Jury :

- M. Eric Audouard, Professeur, Université Jean Monnet Saint-Etienne (Rapporteur)
- M. Patrick Meyrueis, Professeur, Université Louis Pasteur de Strasbourg (Rapporteur)
- M. Jean-Louis de Bougrenet de la Tocnaye, Professeur, Télécom Bretagne (Directeur de thèse)
- M. Kevin Heggarty, Professeur, Télécom Bretagne (Encadrant)
- M. Pierre-Emmanuel Durant, Maître de conférence, Université de Bretagne Sud, Lorient (Examineur)
- M. Denis Battarel, PDG Holotetrix, Brest (Examineur)

Remerciement

Il y a un peu plus de trois années que le département optique de Télécom Bretagne m'a accueilli au sein de son équipe. Ce fut le début d'une grande aventure scientifique, mais également humaine. La Bretagne est une région magnifique que j'ai parcourue de long en large et de côtes en mers, avec un plaisir intarissable. Les différents brestoïses de cœur que j'ai eu la chance de rencontrer lors de ce séjour, sont parvenus à faire en sorte que, moi aussi, je me sente quelque peu l'âme brestoïse.

Je voudrais tout d'abord remercier Professeur Jean-Louis de Bougrenet de la Tocnaye, qui m'a permis de joindre l'équipe du département optique qu'il dirige à Télécom Bretagne.

Je tiens ensuite à adresser de profonds remerciements au professeur Kevin Heggarty pour m'avoir encadré, et pour m'avoir confié ce travail de recherches. Kevin Heggarty a toujours su m'indiquer de bonnes directions de recherche quand il le fallait, me laisser chercher seul quand il le fallait, et a ce talent de savoir expliquer les concepts les plus techniques en des termes très intuitifs. J'ai énormément appris à son contact, j'ai sincèrement apprécié de travailler avec lui et lui suis reconnaissant pour le temps qu'il m'a consacré et toutes les opportunités qu'il m'a données au cours de cette thèse.

Merci à Monsieur Pierre-Emmanuel Durand, Maître de conférences à l'Université de Bretagne Sud, de me faire l'honneur de présider ce jury.

Je remercie Eric Audouard, Professeur à l'Université Jean Monnet Saint-Etienne avec qui j'ai eu le plaisir de travailler, d'avoir bien voulu accepter la charge de rapporteur.

Je remercie Patrick Meyrueis, Professeur à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, pour avoir également accepté d'être rapporteur de ce travail.

J'aimerais aussi remercier Denis Battarel, directeur de la société Holotrix, pour avoir accepté de participer à ce jury, ainsi que pour sa collaboration et ses conseils scientifiques tout au long de ma thèse.

Ce travail n'aurait pu aboutir sans l'aide de nombreuses personnes. Que me pardonnent celles que j'oublie ici, mais j'adresse une pensée particulière au Professeur Bruno Fracasso, l'initiateur de cette aventure à Télécom Bretagne, et qui depuis de nombreuses années, me soutient dans les différents travaux que j'entreprends.

Je suis profondément reconnaissant envers Frédérique Lucarz, Christiane Carré, Marie Colven surtout pour leur aide et leurs corrections de cette thèse.

J'ai eu la chance tout au long de ces années d'être aidé par des assistantes administratives extrêmement efficaces et qui m'ont rendu la vie plus facile. Merci beaucoup donc à Jennifer Romer et à Anne-Catherine Cariou.

Je ne manquerai pas de remercier les membres du département qui se sont toujours montrés disponibles pour m'offrir une aide inestimable : Philippe Grosso, Emmanuel Daniel, Nicole Wolffer, Jean Pierre Clère en particulier pour leur contribution à la mise en place de mes phototraceurs. Merci aussi à une longue série de personnes à TELECOM Bretagne qui m'ont accueilli, aidé aussi bien professionnellement que personnellement, lors de ce séjour que je garderai parmi mes meilleurs souvenirs.

Enfin, cette aventure particulière m'a donné l'occasion de rencontrer une foule d'elfes et de lutins cosmopolites et hauts en couleurs : mes collègues de bureau Hani, et Samir, Barbara ma petite sœur, « It's fantastic » Lida, Mervin avec sa salsa et ce qui a appris de la langue libanaise, Aurélie la souriante, Vinicius le petit sportif brésilien, Kedar et son bon cœur, Hou prêt à tout donner, Bernard Della et ses délires, l'étalon serbe Bogdan, Emilie, Damien au dynamisme à toute épreuve, Nolwenn, Nicolas surtout dans les superbes soirées, et beaucoup d'autres qui se reconnaîtront aisément à la lecture de ces lignes et que je n'oublie évidemment pas. Une simple mention sur une page ne reflète pas l'étendue de mon amitié.

Le soutien de ma famille et de mes amis par téléphone, par mail ou par leur passage à Brest, m'ont permis de mener à bien ce travail exigeant. En particulier, je voudrais remercier mes parents, Mikael. . .

Table des matières

Remerciement	iii
Table des matières	v
Introduction	1
1 Photolithographie et écriture directe	5
1.1 Domaines d'applications	6
1.1.1 L'industrie des semi-conducteurs	6
1.1.2 Les guides d'ondes optiques	6
1.1.3 Les hologrammes synthétisés par ordinateur (HSO) . .	7
1.2 Techniques de fabrication de photolithographie	8
1.2.1 Photolithographie par contact	9
1.2.2 Photolithographie par proximité	10
1.2.3 Photolithographie par projection	11
1.2.4 Fabrication de composants 3D par projection	12
1.2.5 Résolution de la photolithographie par projection . . .	16
1.2.6 Avantages et inconvénients	18
1.3 Techniques de fabrication par écriture directe	19
1.3.1 Écriture directe par faisceau laser	20
1.3.2 Écriture direct par faisceau d'électrons	21
1.3.3 Écriture directe par faisceau d'ions	22
1.3.4 Résolution	22
1.3.5 Avantages et désavantages	23
1.4 Écriture directe à l'aide d'un masque reconfigurable	23
1.4.1 Phototraçage parallèle à base des SLMs à CL	24
1.4.2 Phototraçage parallèle à base des DMDs	26
1.5 Conclusion	27
2 Caractérisation des modulateurs spatiaux de lumière	35
2.1 Modulateurs spatiaux de lumière (SLM)	35
2.1.1 Caractéristiques principales des SLM	36
2.1.2 Les différents technologies de SLM	38

2.2	Modulateurs spatiaux de lumière (SLM) à cristaux liquides . . .	39
2.2.1	Cristaux liquides	39
2.2.2	SLM à cristaux liquides nématiques	41
2.3	Digital Micro-mirror Device (DMD)	43
2.4	Caractérisation d'un SLM <i>Holoeye</i>	45
2.4.1	Montage optique	45
2.4.2	Caractérisation du SLM <i>Holoeye</i>	48
2.4.3	Insolation d'un réseau sinusoïdal	49
2.5	Conclusion	50
3	Amélioration du phototraceur LCD	55
3.1	Composition du phototraceur LCD	57
3.1.1	Système d'illumination	57
3.1.2	Micro-écran à cristaux liquides (LCD)	58
3.1.3	Colonne de réduction	59
3.1.4	L'autofocus	60
3.1.5	Platines de translation XY	60
3.2	Fonctionnement du phototraceur	61
3.2.1	Super résolution (SR)	62
3.2.2	Multiniveaux	63
3.3	Photorésine	64
3.4	Limitations du LCD TL Electronic	65
3.4.1	Forme des pixels	65
3.4.2	Contraste	66
3.4.3	Effet de proximité	67
3.4.4	Effet de bord du micro-écran	68
3.4.5	Limite de résolution	69
3.5	Remplacement du micro-écran	71
3.5.1	Montage mécanique	71
3.5.2	Montage électronique	74
3.5.3	Modifications logicielles	76
3.6	Résultats obtenus avec le micro-écran Epson	77
3.6.1	Forme des pixels et vitesse de traçage	77
3.6.2	Contraste	78
3.6.3	Effet de la surrésolution	79
3.6.4	Effet de bord du SLM	80
3.6.5	Limite de résolution	80
3.6.6	Multiniveaux	82
3.7	Conclusion	89

4	Phototraceur DMD	93
4.1	Première version du Phototraceur DMD	95
4.1.1	Illumination	95
4.1.2	SLM à micro-écran (DMD)	95
4.1.3	Objectif de projection	98
4.1.4	Platines de translation XY	98
4.1.5	Logiciel de pilotage	99
4.1.6	Composants fabriquées par ce Phototraceur DMD	99
4.2	État de l'art	99
4.3	Remplacement de la source lumineuse	101
4.4	Limitation de ce phototraceur	102
4.5	Travaux d'amélioration du phototraceur UV à DMD	104
4.5.1	Source lumineuse	105
4.5.2	Optique de projection	106
4.5.3	Platines de translation	107
4.5.4	Autofocus	109
4.6	Fonctionnement du phototraceur	111
4.6.1	Routines contrôlant l'affichage	112
4.6.2	Routines contrôlant les platines de translation	112
4.6.3	Routines contrôlant les insolations	117
4.7	Montage mécanique	118
4.7.1	Illumination	118
4.7.2	Mise au point	118
4.7.3	Parallélisme des platines avec le plan focal	121
4.7.4	Juxtaposition des imagettes	121
4.7.5	Parallélisme de l'axe des platines avec le DMD	123
4.8	Résultats	123
4.8.1	Limite de résolution	123
4.8.2	Hologramme	124
4.9	Conclusion	126
5	Photopolymérisation à deux photons parallèle	133
5.1	Absorption à deux photons	133
5.1.1	Principe	134
5.1.2	Coefficient d'absorption non-linéaire	135
5.2	Photopolymérisation par absorption à deux photons	137
5.2.1	La photopolymérisation	137
5.2.2	Profondeur de la pénétration de l'ADP	137
5.2.3	La résolution spatiale	139
5.2.4	Exemple d'un phototraceur à 2PP	139
5.2.5	État de l'art	140
5.3	Photopolymérisation parallèle à deux photons	141
5.3.1	L'apparition du 2PP parallèle	142

5.3.2	Premier essai par <i>Télécom Bretagne</i>	144
5.3.3	Démonstration de faisabilité	145
5.3.4	Application du 2PP avec Télécom Saint-Étienne	148
5.4	Conclusion	154
	Conclusion et perspectives	159
	Appendices	163
	A Article	165
	B Profilomètre à microscopie interférométrique	173
B.1	Microscope interférométrique	173
B.2	Profilometrie	174
	C Lampe flash <i>Xenon</i>	177
C.1	Spectre de la lampe flash <i>Xenon</i>	177
C.2	Schéma du circuit de Commande de la lampe Flash <i>Xenon</i>	177
C.3	Liste des composants	179
	D Spectres de réflexion du DMD	181
D.1	Spectres en réflexion des différents DMD	181
	E Code de quelques routines du logiciel du pilotage du DMD	183
E.1	Routines des platines de translation	183
E.2	Routines de la lampe flash <i>Xenon</i>	183
	F Électronique du système de l'autofocus	185
F.1	Schéma du circuit de Commande de l'autofocus	185
F.2	Liste des composants	187
	Acronymes	189
	Table des figures	191

Introduction

Le phototraçage est une technique d'écriture de motifs dans des matériaux photosensibles à l'aide d'un ou plusieurs faisceaux lumineux. Elle est systématiquement utilisée pour réaliser un élément physique à partir d'un schéma conçu par ordinateur (CAO). Les composants ainsi obtenus peuvent être mis à profit dans une multitude de domaines, tels que les masques pour les circuits imprimés, les masques photolithographiques nécessaires à la fabrication des circuits intégrés, les hologrammes synthétisés par ordinateurs, les guides d'ondes ou les MEMs¹.

Les recherches actives menées dans le domaine du phototraçage pour toutes ces applications très porteuses sont essentiellement consacrées à l'accroissement de la résolution, l'agrandissement de la surface d'écriture et la réduction de la durée d'écriture. C'est dans ce contexte que se situe mon travail de thèse.

Habituellement, l'écriture directe sur des matériaux photosensibles fonctionne avec un nombre réduit de faisceaux, souvent un seul faisceau. Malheureusement, la fabrication des structures complexes et de grandes surfaces à l'aide de cette technique allonge la durée d'écriture. Un phototraceur innovant polyvalent à écriture directe a été mis en œuvre au département d'optique de Télécom Bretagne, il y a environ 10 ans. Celui-ci comporte un élément clé : un modulateur spatial de lumière à cristaux liquides qui divise le faisceau incident en un demi-million de faisceaux lumineux. Cette technique rend la vitesse de traçage plus élevée par rapport au phototraçage par monofaisceau. Ainsi, la fabrication des composants prototypes et de composants en petites séries devient plus efficace. Cependant, les performances de ce phototraceur étaient limitées par une taille minimale des structures réalisables de $3\ \mu\text{m}$, une longueur d'onde de travail égale à 436 nm qui se situait dans le bleu et réduisait la gamme de matériaux photosensibles utilisables.

Le premier objectif de ce projet de doctorat était d'améliorer la résolution, la vitesse et la précision du phototraceur à base d'un modulateur spatial de lumière à cristaux liquides existant à Télécom Bretagne afin d'atteindre la résolution limite possible avec ce système. Le second objectif consistait à

1. MEMs : Microelectromechanical systems

mettre en place un nouveau phototraceur à base d'un autre type de modulateur spatial de lumière et d'utiliser également une longueur d'onde dans le proche ultra-violet aux alentours de 365 nm, afin d'élargir la gamme de matériaux photosensibles utilisables et d'accéder à une résolution sub-micronique. Le dernier objectif était d'étudier la faisabilité de la combinaison de cette technique de phototraçage massivement parallèle avec celle de la photopolymérisation à deux photons qui permet de dépasser la limite de diffraction des systèmes de photoinscription classique.

Le travail de doctorat présenté dans ce manuscrit s'articule autour de cinq chapitres. Le premier chapitre présente les différentes techniques de photolithographie classique : masquage par contact, par proximité et par projection. Il décrit également les techniques d'écriture directe par les faisceaux laser, d'ions ou d'électrons, en indiquant les avantages de chacun. La fin de ce chapitre introduit la technique de phototraçage massivement parallèle avec ses avantages et ses inconvénients. Le second chapitre est consacré à la présentation des différents types de modulateurs spatiaux de lumière, en particulier ceux à cristaux liquides et ceux à micro-miroirs.

L'amélioration du phototraceur en place au début de ma thèse consistait à remplacer le modulateur spatial de lumière existant par un autre ayant un plus grand nombre de pixels, afin d'augmenter la vitesse de traçage, et comportant des pixels de plus petites dimensions, pour obtenir une résolution de l'ordre de 1 μm . L'intégration du nouveau modulateur spatial de lumière dans le phototraceur a exigé l'optimisation de ce modulateur pour la longueur d'onde de travail ($\lambda = 436 \text{ nm}$). La description de l'optimisation de ce micro-écran et celle de sa mise en place dans le phototraceur sont l'objet du troisième chapitre.

Ensuite, je présente dans le quatrième chapitre la mise en place d'un phototraceur à base d'un micro-écran constitué d'une matrice de micro-miroirs. Ce phototraceur, à mon arrivée, utilisait une lampe à vapeur de mercure, un objectif de réduction standard et des platines de translation avec une résolution de 300 nm. Pendant les travaux de ma thèse, j'ai remplacé la source lumineuse par une lampe flash *Xenon* filtrable à plusieurs longueurs d'ondes (habituellement aux alentours de 365 nm), afin d'utiliser de nouveaux matériaux photosensibles et de simplifier la synchronisation avec le reste du système. J'ai également mis en œuvre un nouvel objectif de réduction, optimisé pour les longueurs d'ondes du proche ultra-violet et possédant un facteur de réduction $\times 20$. La résolution atteinte après les modifications effectuées devient submicronique, ce qui a nécessité le remplacement des platines de translation car leur résolution devenait critique par rapport à la résolution du traçage.

Dans le cinquième et dernier chapitre, nous avons démontré la faisabilité de la photopolymérisation à deux photons massivement parallèle. Cette nouvelle

technique de fabrication de microstructures polymères a été mise en œuvre dans le cadre des projets Newton et Litho2PP. La première réalisation a été effectuée dans les laboratoires du *Laser Zentrum Hannover (LZH)* à Hannover en Allemagne. Cette collaboration nous ayant donné l'envie de poursuivre ces recherches, nous avons ensuite confirmé l'attractivité de la technique proposée en commun avec un des laboratoires de Télécom Saint-Étienne. Grâce à leur laser femtoseconde performant, de grandes surfaces de photorésine et de matériau sol-gel hybride furent gravées, ce qui nous a permis d'achever dans de bonnes conditions les travaux de recherche ici présentés.

Chapitre 1

Photolithographie et écriture directe

Les travaux de ma thèse, étude des applications des micro-afficheurs pour le phototraçage massivement parallèle des structures submicroniques, sont basés sur la photolithographie et l'écriture directe, leurs applications et leurs techniques. Afin de bien situer mes travaux de thèse dans leur contexte, je présente dans ce chapitre les bases de la photolithographie et l'écriture directe en citant quelques applications. Pour un traitement plus détaillé on peut consulter [1].

Au sein du département d'optique de *Télécom Bretagne*, nous avons développé une nouvelle technique de fabrication qui combine la photolithographie classique par photomasque et l'écriture directe que nous avons nommée *phototraçage parallèle*. Nous avons appliqué cette technique dans notre laboratoire sur deux phototraceurs, le premier est à base de micro-écrans à cristaux liquides (Chapitre 3), et le second est à base de micro-écrans DMD¹ (Chapitre 4).

La photolithographie classique par photomasque et l'écriture directe sont deux techniques qui servent à fabriquer des composants dans des différents domaines, tels que l'industrie des semi-conducteurs, la microphotonique, les systèmes microélectromécaniques.

Sans pouvoir couvrir tous les applications et les techniques de la photolithographie et de l'écriture directe, nous présenterons ici uniquement trois applications : l'industrie des semi-conducteurs, les hologrammes synthétisés par ordinateur (HSO), et les guides d'ondes optiques; quatre techniques de fabrication par photolithographie : par contact, par proximité, par projection, et la fabrication en 3D, et trois techniques de fabrication par écriture directe : par faisceau laser, par faisceau d'électrons, et par faisceau d'ions.

A la fin de ce chapitre, j'introduis l'écriture directe par masque reconfigurable, qui montre l'avantage de la fusion des deux grandes techniques de la

1. DMD : Digital Micro-mirror Device

photolithographie par projection et l'écriture directe.

1.1 Domaines d'applications

1.1.1 L'industrie des semi-conducteurs

L'industrie des semi-conducteurs se base sur la technologie de photolithographie par projection depuis plusieurs années. Cette technique consiste à recopier un photomasque sur un substrat multicouche. Ce substrat est constitué de différentes couches qui sont principalement : un support en silicium, une couche conductrice en nitrure de silicium, et une couche isolante en dioxyde de silicium. La fabrication d'une couche de semi-conducteur consiste à recopier un photomasque sur le substrat (figure 1.1a), ensuite de doper le substrat par d'autres atomes p et n (figure 1.1d), et puis déposer des couches métalliques afin de faire les connexions (figure 1.1e) [2]. Le photomasque utilisé pour la photolithographie classique est fabriqué à l'aide de l'écriture directe, à titre d'exemple à l'aide de e-beam. Ces photomasques sont très onéreux, mais en contre partie ils servent à des fabrications de masse, des milliers voir millions de composants par masque ce qui rend cette technique rentable. Dans les systèmes les plus récents, on utilise actuellement une longueur d'onde de 193 nm, et on fabrique avec une résolution de 45 nm [3].

1.1.2 Les guides d'ondes optiques

Un guide d'onde (figure 1.2) est un système qui sert à guider les ondes électromagnétiques. En optique, les guides d'ondes sont constitués soit de deux matériaux différents, soit d'un seul matériau avec un gradient d'indice. À l'aide de ces guides d'ondes, on peut fabriquer différentes fonctions optiques utilisées en télécommunications optiques, telles que les micro-résonateurs, réseaux de Bragg, multiplexeurs. [4, 5]

La réalisation de guides d'onde sur un substrat de silice à l'aide de la photolithographie classique nécessite plusieurs étapes de fabrications avec l'utilisation de différents masques (section 1.2.3), ce qui rend la fabrication longue et fastidieuse. L'écriture directe par laser rend le processus plus simple [6–9] et offre de nouvelles opportunités pour la construction des composants optiques complexes et 3D dû à l'interaction de la lumière et la matière au point de focalisation du faisceau. La forte puissance au point de focalisation du faisceau modifie l'état du substrat soit en changeant l'indice, soit en polymérisant le substrat selon la nature du substrat.

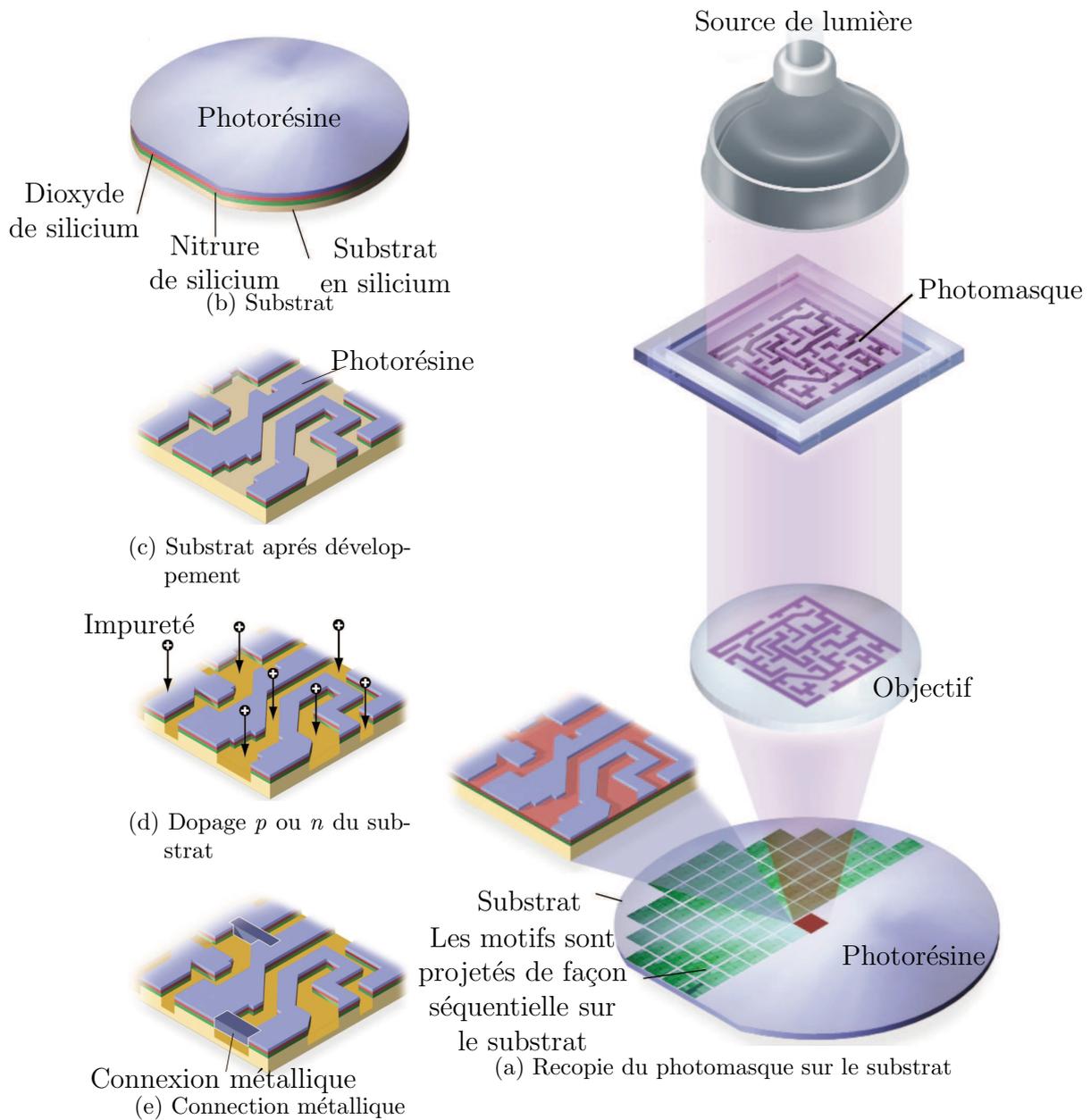


FIGURE 1.1 – Technique de fabrication des semi-conducteurs par la photolithographie classique [2].

1.1.3 Les hologrammes synthétisés par ordinateur (HSO)

Actuellement, l'optique diffractive synthétique fait l'objet de recherches importantes [10–13]. Les hologrammes synthétisés par ordinateur sont égale-

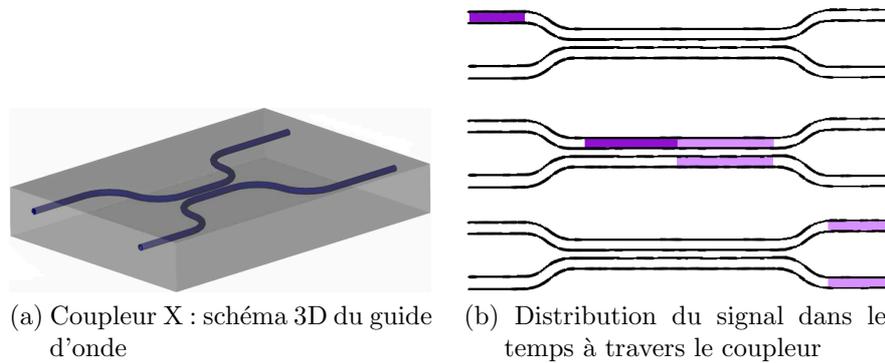


FIGURE 1.2 – Représentation d'un coupleur en X montrant la duplication d'un signal d'entrée à travers le coupleur. [6, 7].

ment des éléments d'optique diffractif (DOE²) [14]. Ces hologrammes calculés par ordinateur sont des composants comportant différents niveaux de phases et permettant de générer quasiment tout type de front d'onde en diffractant la lumière. Ils sont déjà utilisés dans les lasers de puissances, les analyseurs de front d'onde, les têtes de lecture optique (CD, DVD), les dispositifs de traitement optique de l'information.

Le fonctionnement de ces composants très utilisés au département d'optique de Télécom Bretagne et leurs partenaires est illustré à la figure 1.3.

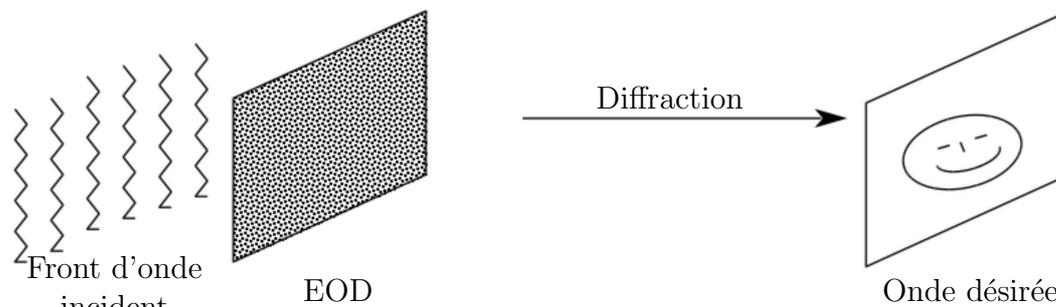


FIGURE 1.3 – Illustration d'un front d'onde diffracté à l'aide d'un hologramme synthétisé par ordinateur afin de reconstruire l'onde désirée.

1.2 Techniques de fabrication de photolithographie

Dans cette section, nous détaillerons quelques différents types de photoinscription par photomasque. Ces différentes techniques consistent à inscrire des

2. DOE : Diffractive Optical Elements

dessins sur des matériaux photosensibles à l'aide de la lumière, la seule différence entre eux est la façon dont sont inscrits les motifs. La photolithographie par contact, par proximité, et par projection nécessitent l'utilisation d'un photomasque, mais l'écriture directe n'en a pas besoin.

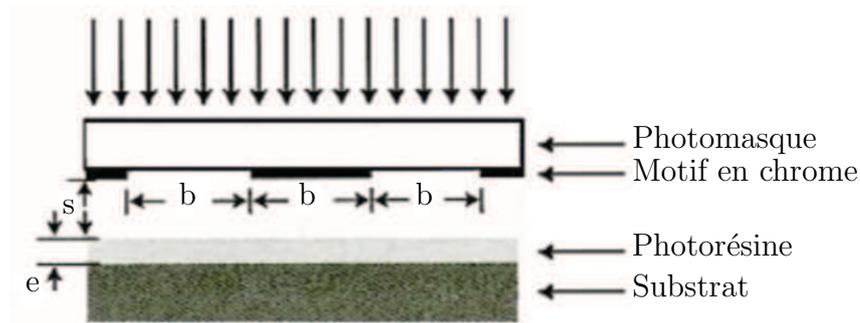
Dans le cadre de cette thèse, nous avons utilisé deux types de matériaux photosensibles : la photorésine et la famille des sol-gels *Ormocer*®. Dans la photorésine positive, on casse les liaisons chimiques entre les chaînes de son polymère par l'absorption de lumière incidente, afin de dissoudre la photorésine dans un développeur chimique contenant de la soude [11]. Dans la famille *Ormocer*®, de type sol-gel hybride, le monomère se polymérise dès l'absorption de la lumière et se colle sur le substrat de verre. Les zones non-insolées sont dissoutes dans l'acétone [15].

Lors de la production des composants à l'aide de la photolithographie par contact ou par projection, tout le motif est inscrit simultanément grâce au photomasque qui contient tous les détails du dessin à reproduire (figure 1.4). Cette technique nécessite la préparation préalable d'un photomasque par écriture directe. Mais quand on possède le photomasque à reproduire, cette technique est adaptée à une production de masse dû à la rapidité de fabrication de chaque composant par recopie. L'écriture directe point par point est utilisée quand on a besoin de sortir de petites séries de composants, ou pour fabriquer des composants prototypes. Dans le cas de fabrication de composants en petites séries et des composants prototypes, le photomasque n'est pas rentable car sa fabrication est lente et très chère. La photolithographie par recopie est très rapide par rapport à l'écriture directe mais en contrepartie nous devons posséder le jeu de nombreux photomasques qui peut coûter plusieurs milliers d'euros. L'écriture directe, bien que lente, est reconfigurable, donnant ainsi la possibilité de fabriquer tout type de motifs.

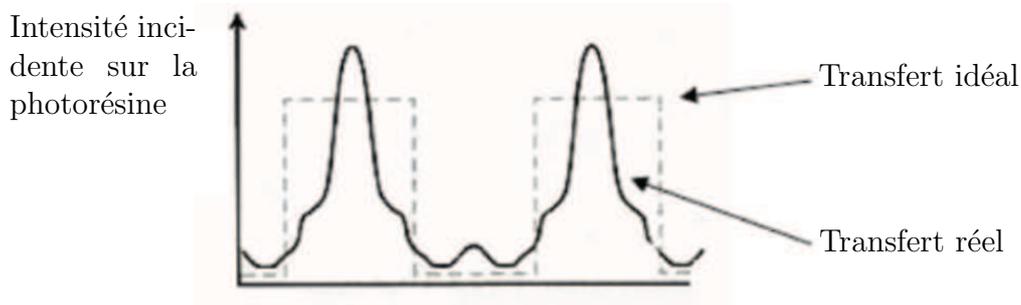
1.2.1 Photolithographie par contact

L'une des méthodes les plus anciennes de la photolithographie est la photolithographie par contact. Cette technique consiste à rapprocher le photomasque en chrome sur un substrat de verre ou silice qui contient le motif à recopier à une couche de résine déposée sur un substrat en verre.

La figure 1.4a montre la technique de photolithographie par contact avec un masque d'un réseau de largeur de ligne b . Pour un parfait contact, qui est très difficile à obtenir en pratique, on obtient un transfert de lumière en forme de créneau (figure 1.4b les traits pointillés) et on obtient une résolution sub-micronique pour une longueur d'onde de 400 nm et d'épaisseur de résine de $1\text{ }\mu\text{m}$. En réalité, à cause de la diffraction de la lumière, la lumière transférée a la forme de la courbe en trait plein dans la figure 1.4b. Plus la surface de contact entre le métal et la photorésine est plane, plus la lumière transférée se rapproche de la forme de transfert idéal. Obtenir un contact parfait des



(a) Photolithographie par contact



(b) Profil de lumière sur la résine

FIGURE 1.4 – Schéma illustratif d'une reproduction d'un photomasque à l'aide de la photolithographie par contact (figure 1.4a), le profil de l'intensité lumineuse sur la photorésine est en trait pointillé de la figure 1.4b et le transfert idéal de la lumière est trait plein (figure 1.4b). [1]

deux surfaces planes est quasi-impossible dû aux poussières et à la planéité imparfaite des substrats. De plus, le contact entre la photorésine et le métal endommage les deux surfaces qui diminue la planéité, ce qui réduit dans le pire des cas l'utilisation à un substrat par photomasque et à un photomasque par substrat. Cette contrainte particulièrement forte dans la fabrication de composants 3D, et nécessitant l'utilisation de plusieurs photomasques, a conduit à l'abandon progressif de cette technique dans les années 1970 pour la production de masse de circuits intégrés électroniques. La dimension critique des motifs reproduits était alors de l'ordre de $5 \mu m$ [1].

1.2.2 Photolithographie par proximité

La technique de photolithographie par proximité est la similaire à celle de la photolithographie par contact mais avec un espacement entre le photomasque et la photorésine. L'introduction d'un espacement entre le photomasque et la photorésine peut contourner certains inconvénients inhérents à la photolithographie par contact. Cependant la résolution se dégrade rapidement en

augmentant l'espace entre les deux surfaces de contact. Pour un espacement $10\mu m < s < 25\mu m$ (figure 1.4a), il est possible d'atteindre une résolution de $3\mu m$ pour une longueur d'onde de 400 nm [1]. La lithographie par proximité nécessite une planéité du substrat et du photomasque inférieure à $10\mu m$, afin de garantir qu'aucun contact risque d'endommager le photomasque et le substrat.

On peut noter que, dans ces système de recopie par proximité, la réduction de la longueur d'onde améliore la résolution plus facilement que dans la photolithographie par projection, car beaucoup moins sensible à l'absorption et aux aberrations chromatiques du système optique utilisé pour projeter l'image du photomasque. En contrepartie, la mise en œuvre de cette technique la rend plus difficile que celle de la photolithographie par projection, comme le réglage du parallélisme du plan du photomasque avec celui du substrat surtout quand la distance entre les deux plans est de quelques micromètres.

1.2.3 Photolithographie par projection

La technique de la photolithographie par projection est indiquée schématiquement dans la figure 1.5. Comme le montre la figure, une source lumineuse illumine le photomasque dont l'image est projetée sur le substrat à l'aide de lentilles de projection avec un facteur de réduction allant de 5 à 20. Un avantage important de cette technique est le faible coût du photomasque par rapport à celui de la photolithographie par contact, car les détails les plus fins de l'ordre de quelques micromètres sont plus simples à fabriquer que des détails de quelques centaines de nanomètres.

La technique de projection diffère en fonction du composant à fabriquer. La fabrication des composants mono-couche nécessite un photomasque binaire comportant des endroits transparents correspondant aux zones qui seront gravées jusqu'au substrat et les zones opaques correspondant aux endroits non insolés. Par contre, la fabrication des composants 3D nécessite des techniques plus sophistiquées. Une de ces méthodes est d'utiliser plusieurs photomasques binaires (noir et blanc), cette technique consiste à insoler le premier photomasque, à développer la photorésine, et à graver le substrat. Ensuite une autre couche de photorésine est déposée afin d'être insolée par le second photomasque aligné avec la première gravure. Les étapes d'alignement du photomasque, d'insolation, de développement, et gravure sont répétées afin d'obtenir les différents niveaux de profondeurs (figure 1.6). À l'inverse, on peut par un seul masque et en une seule insolation en ayant recours aux photomasques à niveaux de gris [11, 13, 17] (figures 1.7 et 1.8) fabriquer des composants 3D. Ces techniques sont détaillées dans les sections suivantes.

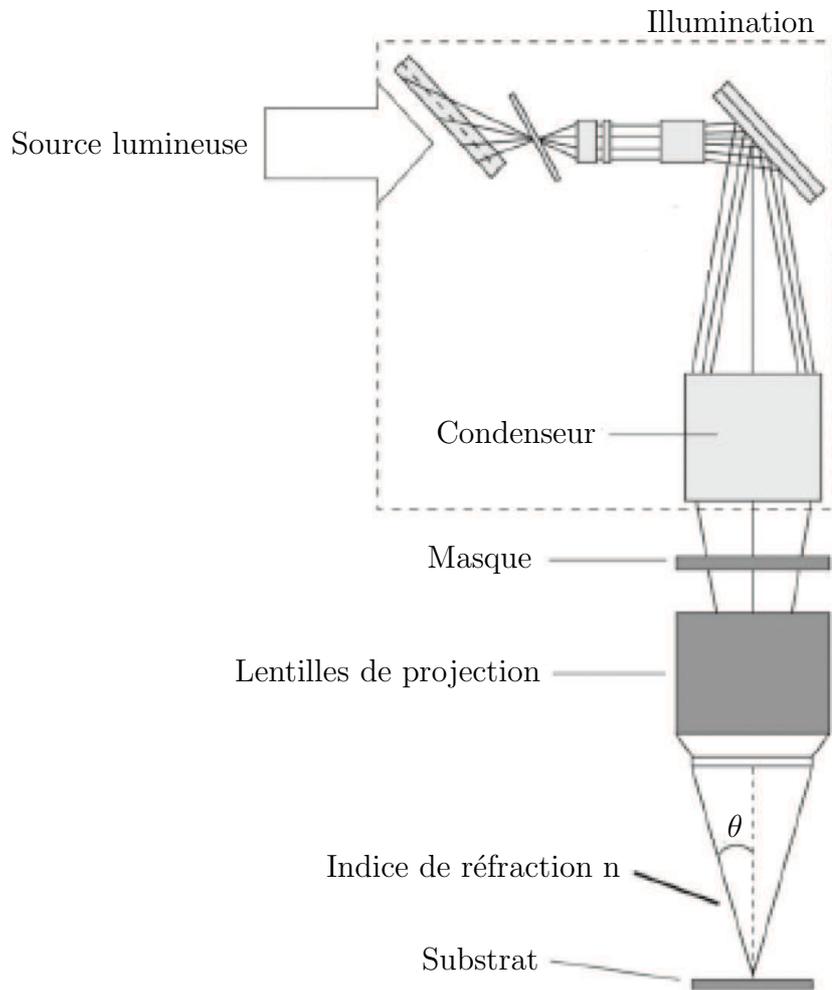


FIGURE 1.5 – Schéma illustratif de la technique de photolithographie par projection. [16]

1.2.4 Fabrication de composants 3D par projection

Fabrication de composants 3D à l'aide de photomasques binaires

La fabrication de composants 3D à l'aide de photomasques binaires consiste à insoler successivement les différentes profondeurs (figure 1.6). Par exemple, un photomasque binaire génère deux niveaux de profondeurs sur la photorésine qui correspondent aux zones insolées et non insolées. Ces niveaux sont obtenues par le processus suivant : dépôt de photorésine, insolation du photomasque, développement du motif, et gravure du substrat. En appliquant toujours le même processus, une deuxième insolation à l'aide d'un autre masque double le nombre de niveau de profondeur dans la photorésine. Plus le nombre de masques augmente, plus le nombre de niveaux de profondeurs augmente.

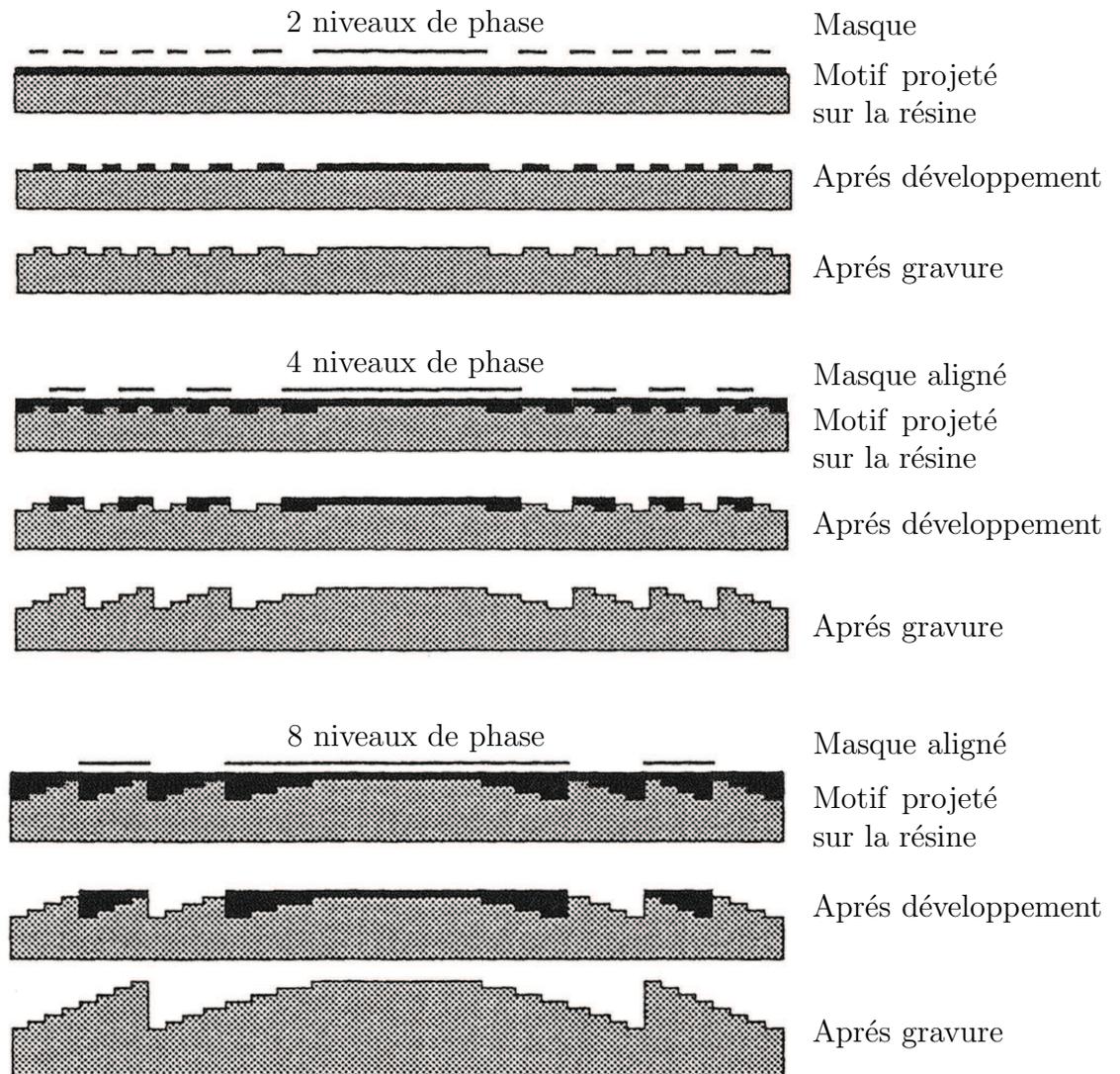


FIGURE 1.6 – Photolithographie 3D à l'aide de plusieurs photomasques binaires. [18]

Deux, trois ou quatre photomasques sont respectivement nécessaires pour la fabrication de 4, 8 ou 16 niveaux de profondeur.

L'alignement des différents masques rend la fabrication des composants 3D par cette technique difficile. De plus, les masques sont onéreux, et leur confection est généralement longue. Par conséquent, plus le nombre de masques nécessaires est grand, plus la durée et le coût de fabrication sont élevés.

Fabrication 3D par filtrage spatial de l'intensité lumineuse

La technique de fabrication des composants 3D à l'aide d'un photomasque par filtrage spatial est a priori moins coûteuse que par photomasques binaires, car une seule étape est requise pour insoler la photorésine. Ce photomasque est constitué des trous de dimension inférieure à la résolution de l'optique de projection afin de moduler l'éclairement transmis [11]. Les trous ne sont pas résolus par l'optique de projection et modulent simplement l'éclairement lumineux transmis. On introduit souvent du filtrage spatial dans l'optique de projection afin d'assurer que les "trous" ne sont pas résolus par le système, d'où le nom de la technique.

Comme le montre la figure 1.7, il existe deux méthodes de contrôle de l'intensité lumineuse transmise : augmenter la densité des trous ou augmenter la taille des trous. Plus on augmente la taille ou la densité des trous, plus on transmet de lumière et plus on grave plus profondément la photorésine [17].

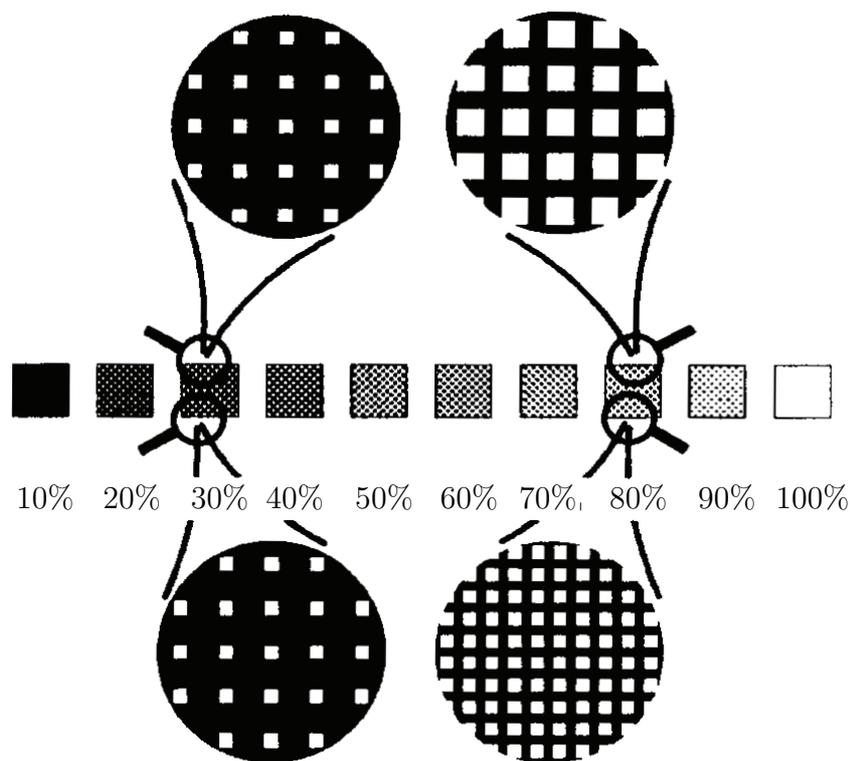


FIGURE 1.7 – Photolithographie 3D par filtrage spatial. [17]

La fabrication de masques à filtrage spatial se fait à l'aide de l'écriture directe. Afin d'améliorer la résolution des composants fabriqués, la longueur de travail est de plus en plus petite, allant jusqu'à 193 nm. Or les trous sont de taille plus petites que la longueur d'onde ce qui rend la fabrication de plus

en plus sophistiquée et onéreuse. En plus, les trop petits trous introduisent une diffraction élevée, qui limite la résolution et le rendement énergétique.

Fabrication 3D à l'aide de photomasques à niveaux de gris

Un seul masque à filtrage spatial est capable de fabriquer des composants 3D, tandis que nous avons besoin de plusieurs masques binaires classiques pour obtenir le même composant 3D. Quatre photomasques binaires peuvent être remplacés par un seul masque à filtrage spatial. On peut aussi fabriquer des masques avec des vrai niveaux de gris permettant de réaliser de tels composants (figure 1.8).

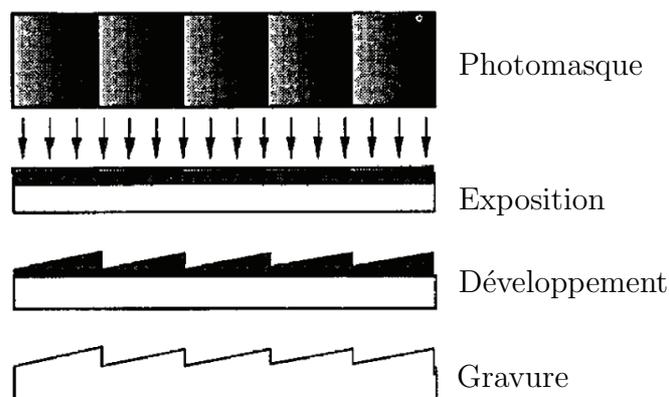


FIGURE 1.8 – Photolithographie 3D par niveaux de gris. [11]

Cette technique est très onéreuse pour le prototypage mais efficace pour la production de masse, par contre elle n'est pas compatible avec les composants CMOS standard. Suleski et *al.* [11] ont obtenu des photomasques par l'impression du motif désiré sur des films transparents à l'aide des imprimantes industrielles. Däschner et *al.* [13] ont obtenu d'autres types de masques à niveaux de gris et à plus forte résolution qui sont fabriqués à l'aide de l'écriture par faisceau d'électrons dans un verre sensible au faisceau de grande énergie. La photoréduction de ce type de masque génère des niveaux de profondeur dans la photorésine dont la valeur de profondeur est en relation directe avec l'intensité de la lumière transmise par ce masque.

Cette technique de fabrication des composants 3D est potentiellement moins coûteuse que les autres techniques de fabrication : elle nécessite un seul photomasque, et une seule étape d'insolation donc pas besoin d'alignement du photomasque avec le substrat. En contre partie, le photomasque de cette technique est très onéreux et le contraste analogique du masque est difficilement contrôlable et peu compatible dans les lignes de productions photolithographiques habituelles.

1.2.5 Résolution de la photolithographie par projection

La résolution d'un système de photolithographie optique par projection est généralement exprimée par la relation :

$$CD = k_1 \frac{\lambda}{NA} \quad (1.1)$$

où CD est la dimension critique du plus petit élément résolu par le système optique [2, 19, 20], λ est la longueur d'onde, et NA est l'ouverture numérique du système optique de projection. Le facteur de proportionnalité, k_1 , est déterminée empiriquement et tient compte de plusieurs facteurs dont la cohérence de la lumière, la complexité du photomasque, la réponse de la photorésine.

Afin d'augmenter la résolution du système optique il faut réduire la dimension critique. Pour faire ceci on doit modifier les facteurs k_1 , λ , NA et réduire les dimensions des composants à fabriquer.

Les limites de l'imagerie optique ont été décrites il y a un siècle par *Ernst Abbe*, un professeur à l'Université de Jena, en Allemagne. Il a conclu que la largeur minimale d'une ligne et l'espacement minimal d'un motif répétitif qu'un système optique peut reproduire sont directement proportionnels à la longueur d'onde (Section 1.2.5) de la lumière qui projette l'image et inversement proportionnels à l'ouverture numérique du système.

Longueur d'onde λ

Le choix de la longueur d'onde est déterminé par la disponibilité de sources de rayonnement existantes et du système optique de projection. La réduction de la longueur d'onde améliore la résolution mais cette modification est la solution la plus contraignante pour les entreprises car cela exige un changement complet de tout le matériel de fabrication. Le changement de la longueur d'onde nécessite l'achat de nouvelles sources, à titre d'exemple le passage la longueur d'onde 365 nm à 248 nm et à 193 nm dans les systèmes les plus évolués [19]. Le passage à ces longueurs d'ondes nécessite aussi le changement du système optique afin qu'il n'absorbe pas ces longueurs d'ondes et aussi le changement de la photorésine utilisée. En conclusion, le changement de tout le système optique est le dernier recours pour l'industrie sachant que l'innovation de la longueur d'onde a abouti à la fabrication des transistors dont les plus petits détails caractéristiques mesurent une centaines de nanomètre [2](Voir ci-dessous).

Ouverture numérique NA

D'après l'équation 1.1, plus l'ouverture numérique (NA) de l'objectif est élevée plus la dimension critique que le système peut résoudre diminue. Le processus d'augmenter l'ouverture numérique a dû surmonter des défis importants

dans la conception optique et de fabrication, car l'objectif doit comporter un minimum d'aberrations, et avoir un diamètre aussi large que possible (résolution et rendement énergétique). Malgré ces difficultés, l'ouverture numérique de systèmes de projection n'a cessé de croître de 0,5 autour des années 90 à plus de 0,8 en 2004, avec des perspectives au delà de 0,9 dans l'avenir.

Les systèmes optiques de lithographie fonctionnent généralement dans un environnement gazeux (air ou azote), dont l'indice de réfraction n est à peu près égal à 1. L'ouverture numérique étant définie comme le produit $n \sin \theta$ (cf. figure 1.5), sa limite physique supérieure est l'unité. Cette valeur théorique ne serait cependant atteinte que si les lentilles étaient infiniment larges et récoltaient 100% de la lumière incidente. Cependant, on peut augmenter l'indice de réfraction du milieu de propagation de la lumière jusqu'à 1.45, en remplaçant le gaz ambiant avec un milieu condensé, à titre d'exemple un liquide transparent. L'immersion du système dans un liquide commence à être utilisée dans l'industrie de la photolithographie, comme les systèmes à immersion dans l'eau commencent à être installés par *AMSL, Nikon, Canon...*

Facteur k_1

Afin de modifier λ et NA , il faut concevoir un tout nouveau système optique dont le prix peut monter à plusieurs millions de dollars [2]. Par contre la modification du facteur k_1 n'exige pas toujours une nouvelle technologie de matériel. Un processus où $k_1 = 0,8$ est généralement considéré comme aisément réalisable ; un processus où k_1 est inférieur à 0,5 exige l'application de certains artifices expérimentaux.

La réduction du facteur k_1 est réalisée par les techniques d'accroissement de la résolution "*RETs*³". Les trois principales techniques de *RET* sont chacune fondées sur l'une des propriétés essentielles des ondes électromagnétiques qui sont la direction de propagation, la phase et l'amplitude. La technique d'*illumination hors axe* (*OAI*⁴) explique comment améliorer la résolution en insérant un élément optique dans l'illumination de telle sorte que le faisceau lumineux éclaire le photomasque sous un angle bien déterminé, en se basant sur la propriété de la direction de propagation [21]. Les *masques à variation de phase*, comme leur nom l'indique, exploitent la phase de l'onde illuminant [3, 21, 22]. On modifie la phase de l'onde incidente à l'aide d'un masque de phase produisant des interférences constructives et destructives dans l'image projetée. En choisissant les zones de déphasage correctement les interférences destructives se situent aux bord des motifs et la résolution est améliorée. On pré-compense à l'aide de la *correction de l'effet de proximité* le lissage des coins produit par la limite de résolution, pour plus d'information voir la référence [2].

3. RET : Resolution Enhancement Techniques

4. OAI : Off-axis illumination

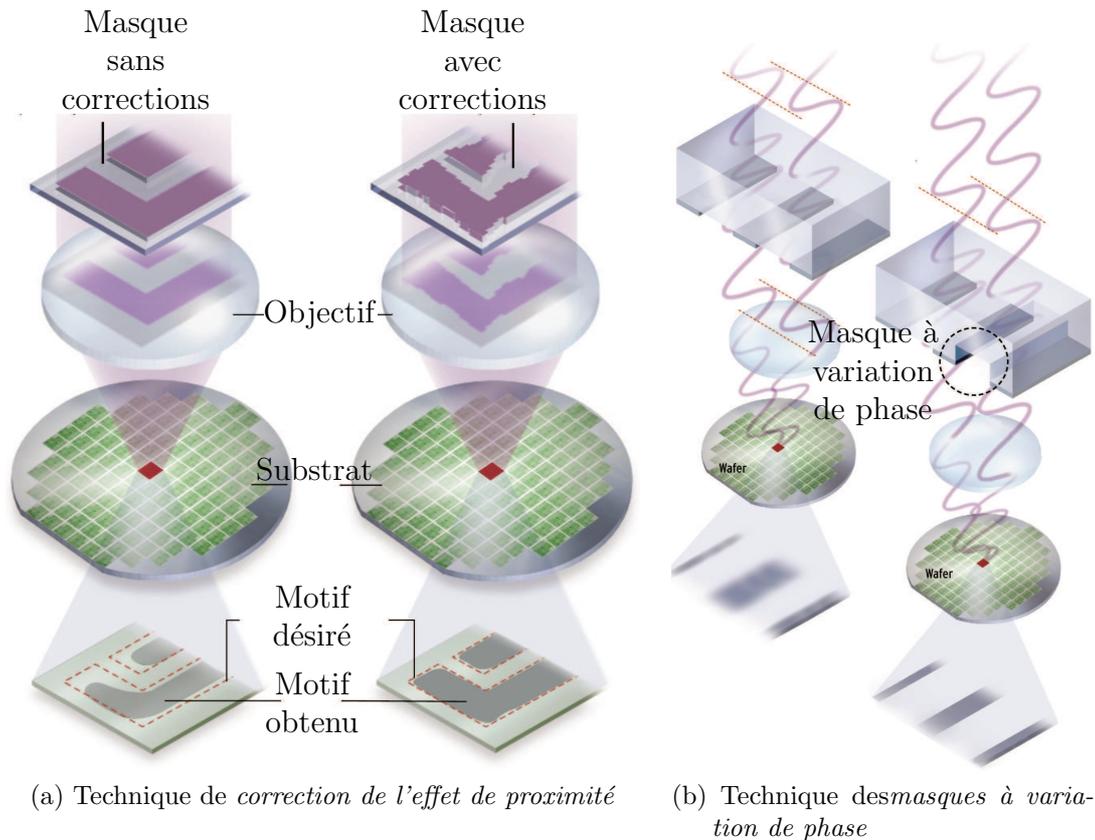


FIGURE 1.9 – Les techniques d'accroissement de la résolution :

La figure 1.9a montre la technique de *correction de l'effet de proximité* où la correction du photomasque implique une amélioration du motif gravé afin qu'il soit le plus proche au motif désiré.

La figure 1.9b montre la technique des *masques à variation de phase* afin de diffracter la lumière et produire des interférences constructives et destructives dans le but de situer les zones destructives aux bords des motifs pour améliorer la résolution. [2]

1.2.6 Avantages et inconvénients

D'après M. Lahmani et *al.* [1], la résolution des composants fabriqués à l'aide de la technique de photolithographie par contact peut atteindre $1 \mu\text{m}$. Mais pour obtenir cette résolution il faut obtenir un contact parfait entre le photomasque et la photorésine, ce qui est très délicat à obtenir. Dans nos laboratoires nous obtenons une résolution de $2 \mu\text{m}$ par cette technique.

M. Lahmani et *al.* [1] ont également montré que la résolution de la photolithographie par proximité est limitée à $3 \mu\text{m}$ pour une longueur d'onde de travail de 400 nm .

F. Schellenberg et *al.* [2] ont utilisé la technique de photolithographie par

projection par immersion où ils ont obtenu une résolution de 65 nm sous une longueur d'onde de 193 nm, et ils citent aussi une résolution de 45 nm obtenue avec la même longueur d'onde.

La photolithographie par contact, par proximité, ou par projection sont les méthodes les plus adaptées à la production de masse de grandes séries dû à leur rapidité de production. En contre partie, la fabrication des composant prototype par la photolithographie classique de recopie des photomasques est une méthode chère et lente car les photomasques qui sont fabriqués par la technique d'écriture directe sont chers souvent plusieurs milliers de dollars et lent à fabriquer surtout ceux qui sont complexes. Le tableau 1.1 montre quelques exemple de résolutions typiquement obtenues pour les différentes techniques de photolithographie.

Technique	Longueur d'onde	Résolution
photolithographie par contact	400 nm	1 μm
	157 nm	0.15 μm
photolithographie par proximité	400 nm	3 μm
photolithographie par projection (par immersion)	193 nm	65 nm

TABLE 1.1 – Les résolution atteinte par les différentes techniques pour quelques longueurs d'ondes [1, 2]. Ces valeurs datent des années 2003 et 2006.

1.3 Techniques de fabrication par écriture directe

L'écriture directe est une technique de photoinscription dans des matériaux photosensibles en utilisant un faisceau modulé : laser [23–25], de rayons X [26], d'électrons [27], ou d'ions [28] sans passer par l'intermédiaire d'un photomasque. Un contrôle précis de l'intensité du faisceau lors de l'exposition et des paramètres de développement de la résine permet de fabriquer des micro-structures à relief continu dans une épaisseur de résine jusqu'à 5 μm avec une résolution latérale supérieure à 10 nm [18]. Des microstructures complexes peuvent donc être fabriquées directement à partir d'un schéma conçu par ordinateur (CAO⁵) par une exposition suivie d'un processus de développement approprié. Un attrait majeure de cette technique d'écriture directe réside donc dans la flexibilité du processus de fabrication. L'utilisation de cette technique ne nécessite pas de masque, ce qui rend la fabrication des composants

5. CAO : Conception Assistée par Ordinateur

prototypes ou la fabrication des petites séries moins chère et plus rapide. En contre partie, la fabrication des grandes séries par masquage est plus rentable et plus rapide et le prix onéreux du photomasque est récupéré sur le nombre élevé des éléments produits.

1.3.1 Écriture directe par faisceau laser

L'exposition par écriture directe par faisceau laser est généralement réalisée par un balayage du substrat sous un faisceau laser ou parfois par le balayage du faisceau sur le substrat. Ce faisceau est focalisé (figure 1.10) et synchronisé

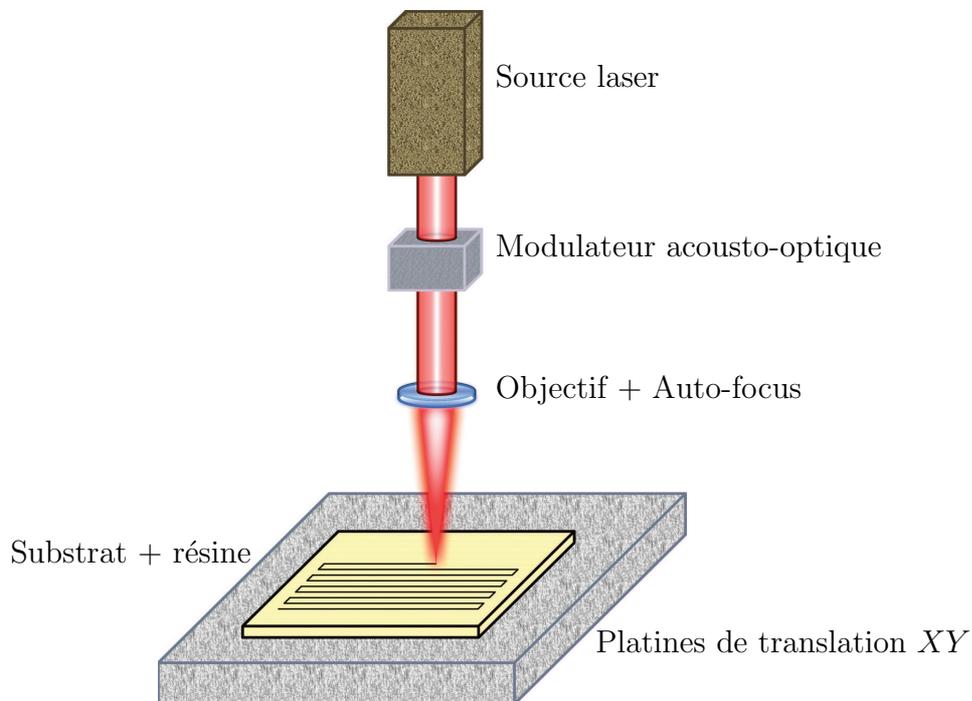


FIGURE 1.10 – Principe d'un système d'écriture directe par faisceau laser. [29]

avec un modulateur de lumière afin de créer des motifs binaires, ou à profil 3D multiniveaux, ou continu dans la photorésine. Un logiciel de dessin optique génère les données de phototraçage qui déterminent l'intensité de la lumière incidente et la vitesse de déplacement des platines de translation [24] qui sont en relation directe avec la profondeur souhaitée de gravure. Un grand avantage de l'écriture directe par faisceau laser est le coût du matériel (laser, optique...) et les matériaux photosensibles (photorésine, substrat...) qui sont habituellement nettement moins chers que les équipements équivalents pour l'écriture directe par faisceau d'électrons ou ions. Comme l'écriture directe par faisceau laser est peu onéreuse, elle est plus répandue que l'écriture directe par e-beam ou par faisceau d'ions. D'autre part, la résolution de l'écriture directe

par faisceau laser peut atteindre quelques centaines de nanomètres par rapport à celle des autres techniques pouvant atteindre quelques nanomètres comme l'indique le tableau 1.2.

1.3.2 Écriture direct par faisceau d'électrons

L'écriture directe par faisceau d'électrons de microstructures binaires ou à relief continu dans une résine électrosensible représente une technique alternative à l'approche écriture directe par faisceau laser décrit dans la section 1.3.1. Un système e-beam est montré dans la figure 1.11. La source d'électrons

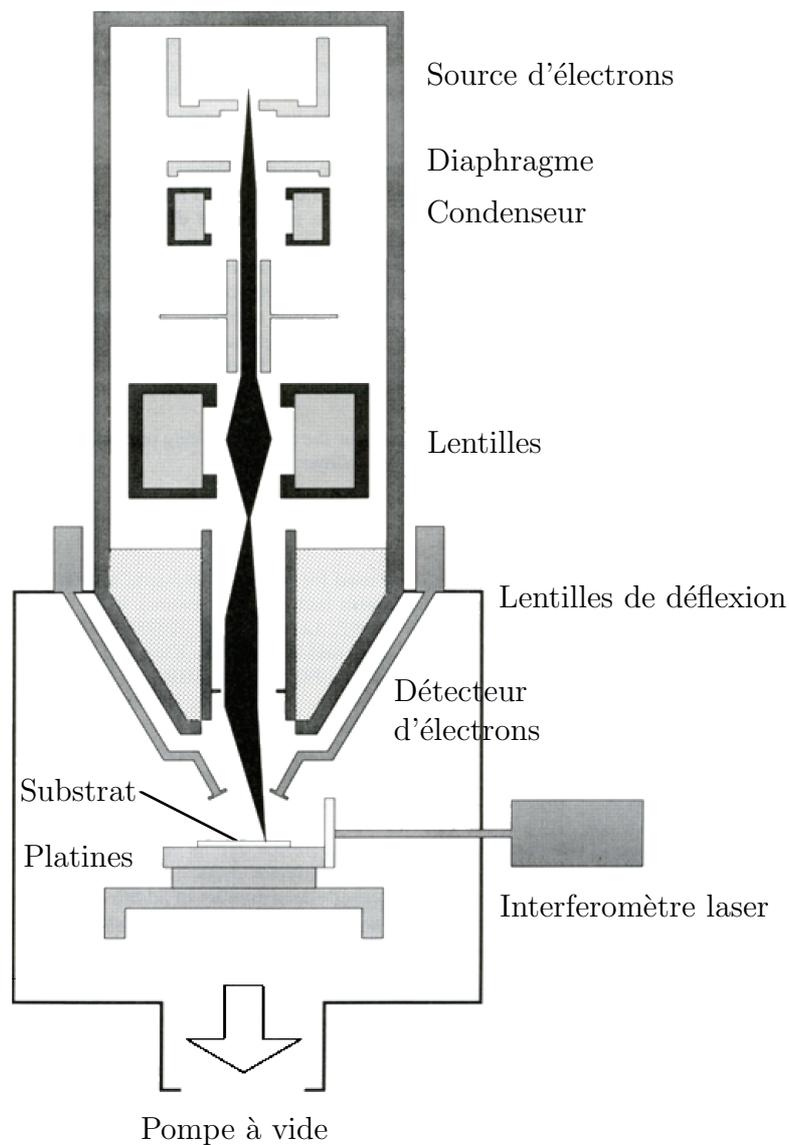


FIGURE 1.11 – Système d'écriture directe par faisceau d'électrons [29].

expose le substrat sous vide en passant par des optiques électroniques et des lentilles de déflexion. Le substrat est posé sur des platines de translation de haute résolution (< 10 nm). Cette technique de haute résolution, 2 nm de résolution [18], souffre encore d'un problème très important qui limite sa résolution, la *Proximity effect* [27, 30], qui est particulièrement gênant avec les composants épais ~ 1 à $5 \mu\text{m}$.

Des systèmes e-beam commerciaux de résolution de 100 nm sont présents sur le marché avec des prix de 3~5 millions de dollars [18], ce qui peut atteindre le triple des systèmes à base de laser [18].

1.3.3 Écriture directe par faisceau d'ions

L'écriture directe par faisceau d'ions (FIB⁶) peut être utilisée pour le fraisage direct des structures avec des dimensions submicroniques dans une variété de matériaux. Le système de base de FIB est similaire à un système d'écriture par faisceau d'électrons comportant une chambre à vide, des lentilles de déflexion du faisceau et des platines de translation xy programmables, sauf qu'il est équipé d'une source d'ions (généralement Gallium) avec une "*optique*" qui convient à la focalisation et à la déflexion des ions. Le faisceau d'ions focalisé a suffisamment d'énergie pour graver les substrats comme le verre, le quartz, le silice ou le GaAs. La profondeur à laquelle le matériau est broyé est liée à la dose d'ions et contrôlée par le temps d'exposition.

1.3.4 Résolution

La résolution de l'écriture directe par faisceau laser est en général limitée à 500 nm [18], cette limitation est bien définie par la relation de Rayleigh (équation 1.1). Cette relation est toujours valide dans le cas d'une absorption classique à un photon, mais dans le cas d'une absorption à multi-photon (effet non-linéaire) la résolution dépasse la limite de la diffraction [23] et sera plus petite que la longueur d'onde. Nous avons travaillé sur ce point, polymérisation à deux photons, dans le chapitre 5.

Même en dépassant la limite de la résolution avec les sources lasers, l'écriture directe avec faisceau d'électrons demeure la meilleure du marché et dans les laboratoires par sa résolution. Dans l'industrie les e-beam commercialisés ont une résolution allant de 10 [31] à 100nm [18], mais il existe quelques études qui ont montré des résolutions de 1~2 nm [1]. Le tableau 1.2 montre quelques résolutions obtenues pour les différentes techniques d'écriture directe discutées dans ce manuscrit.

6. FIB : Focused ion beam

Technique	Résolution
Écriture directe par faisceau laser	500 nm
Écriture directe par faisceau d'électrons	1 nm
Écriture directe par faisceau d'ions	8 nm

TABLE 1.2 – Les résolutions atteintes par les différentes techniques d'écriture directe [1, 18].

1.3.5 Avantages et désavantages

Les techniques d'inscription par écriture directe sont les techniques les plus flexibles parmi les techniques de photoinscription. Plus besoin de photomasques, ni pour les structures binaires, ni pour les structures à relief continue, le changement d'un motif peut être fait en modifiant les fichiers informatiques, donc plus besoin de changer le photomasque à chaque fois. De plus les résolutions obtenues à l'aide de ces techniques sont de l'ordre de quelques nanomètres, qui reste inatteignables par des techniques de masquage classiques.

Ces méthodes présentent cependant des inconvénients qui s'avèrent être redhibitoires lorsqu'il s'agit de produire en série des structures complexes. La fabrication des structures complexes de 1 cm^2 [18] peut durer plusieurs heures, ce qui augmente énormément les prix des composants. Ces techniques sont donc peu intéressantes pour la production de masse dû au coût de fabrication et à la durée de fabrication qui sont très élevés. Aujourd'hui, l'écriture directe est utilisée pour la fabrication des photomasques destinés à la photolithographie par projection, pour la fabrication de composants de petites séries, ou pour le prototypage des composants, «master» servant aux autres techniques de réplique telle que la recopie par estampage ou moulage.

Cette technique est bien adaptée à la fabrication de photomasques qui servent à la production de masse pour les techniques de recopie, estampage ou moulage [15].

1.4 Écriture directe à l'aide d'un masque reconfigurable

Bien souvent aucune des techniques de photolithographie ou d'écriture directe ne combine à la fois une rapidité de fabrication, une haute résolution, une reconfigurabilité et un coût avantageux. La photolithographie par masquage est très rapide en fabrication et elle est utilisée pour la production de masse. L'écriture directe est reconfigurable mais elle est lente car elle grave point par point et elle est utilisée pour le prototypage et les petites séries. Pour cette raison, une nouvelle technique, la photolithographie par masque recon-

figurables a été étudiée pour combiner sa rapidité de fabrication (offerte par la photolithographie par projection de masque) et sa reconfigurabilité (comme l'écriture directe).

Cette technique consiste à remplacer le photomasque dans la photolithographie par projection par un modulateur spatial de lumière (SLM⁷) programmable. Cette technique offre un masque reconfigurable en temps réel. Ces phototraceurs offrent donc un gain de rapidité pour un coût avantageux. Les SLMs sont des matrices de pixels, l'illumination de ces modulateurs génère entre un demi million à un million et demi de faisceaux afin d'insoler une surface importante de la photorésine simultanément d'où le nom "*massivement parallèle*".

Plusieurs laboratoires ont étudié et appliqué cette technique. Différents types de SLMs ont été utilisés, soit des modulateurs à base de cristaux liquides [32–36], comme dans notre laboratoire (chapitre 3), soit à base de modulateurs de matrice de micro-miroirs (DMD^{8,9}) [37–39], technique que nous avons également développée dans notre laboratoire sur un phototraceur DMD qui sera détaillé dans le chapitre 4 (voir figure 1.12b).

D'autres variantes de cette technique existent, par exemple Gil et al. [40] ont développé un phototraceur à base d'un modulateur GLVTM¹⁰. Ce modulateur est une matrice linéaire de 1088 pixels. Ils ont utilisé un laser GaN de puissance 25 mW et de longueur d'onde $\lambda = 400$ nm pour leurs expositions. La résolution de leurs spots était de 786 nm et des lignes étaient de 250 nm en superposant différents bords de spots.

Elfström et al. [41] n'ont pas utilisé un modulateur spatial de lumière dans leur technique mais une matrice de micro-LED¹¹. Cette source de lumière est une matrice de 8×8 micro-pixels LED de nitrure de gallium de longueur d'onde $\lambda = 370$ nm. La dimension critique obtenue par leur système est de 8 μm .

1.4.1 Phototraçage parallèle à base des SLMs à CL

Les modulateurs spatiaux de lumière à base de cristaux liquides peuvent remplacer les photomasques dans la technique de photolithographie par projection. Un des inconvénients majeurs de ces SLM à base de cristaux liquides est qu'elles doivent être utilisées avec des longueurs d'ondes dans le domaine du visible et de l'infra-rouge car les molécules des cristaux liquides sont endommagées par la lumière ultra-violet. Deux modes de configuration de modulateurs existent : transmission [32, 33, 36] ou réflexion [34, 35].

7. SLM : Spatial Light Modulator

8. DMD : Digital micro-mirror device

9. DMD : Deformable micro-mirror device

10. GVL : Grating Light Valve

11. LED : Light emitting diode

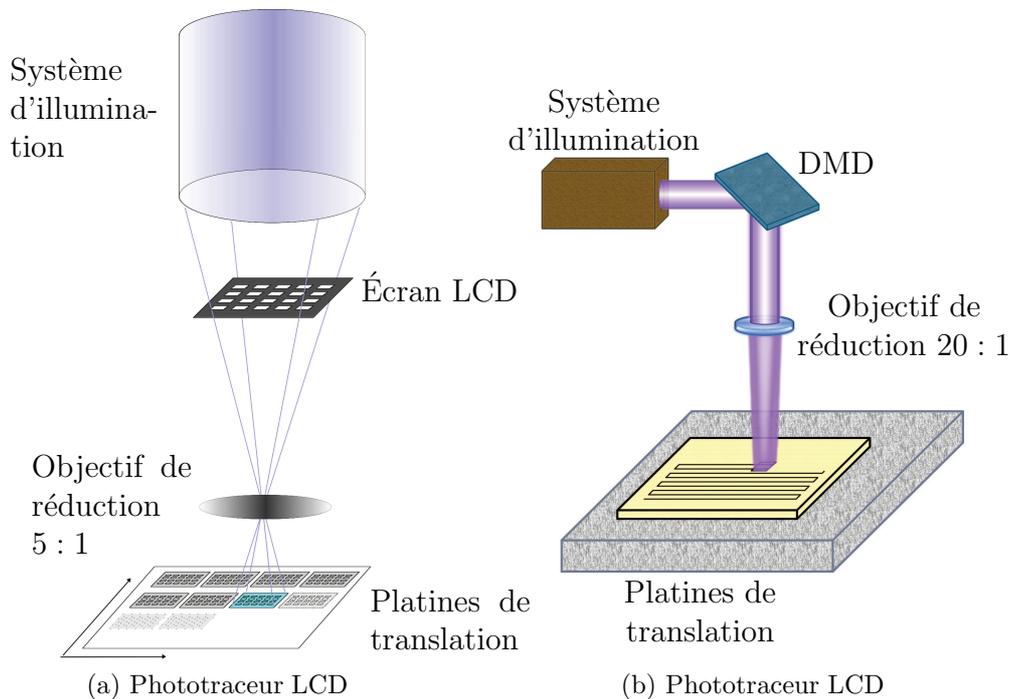


FIGURE 1.12 – Schémas illustratifs des phototraceurs LCD et DMD.

Figure 1.12a : Phototraceur LCD : la lampe illumine le micro-écran LCD. L'objectif de réduction projette l'image sur le matériel photosensible avec un facteur cinq dans notre cas. La substance photosensible est déposée sur un substrat en verre qui est à son tour mis sur des platines de translations. Figure 1.12b : Phototraceur DMD : la lampe illumine le DMD. L'objectif de réduction projette l'image sur le matériel photosensible avec un facteur vingt dans notre cas. La substance photosensible est déposée sur un substrat en verre qui est à son tour mis sur des platines de translations.

Peng et *al.* [32, 33] ont développé l'écriture directe parallèle en utilisant un micro écran à cristaux liquides de 1024×768 pixels comme un masque reconfigurable mais sans platine de translation XY . Ils ont obtenu une dimension critique de $1,6 \mu m$ pour un facteur de réduction de $1/20$, mais une zone d'écriture totale faible $\sim 1 mm^2$.

Kessels et *al.* [36] ont développé un phototraceur à Télécom Bretagne. Ils ont utilisé un SLM de 800×600 pixels avec un objectif de réduction de facteur 5 : 1 et des platines de translations. La vitesse de traçage est de $2,9 mm^2/s$ pour une dimension critique de $1 \mu m$ avec un gap de 3 à $5 \mu m$. Ce phototraceur sera le sujet des travaux du chapitre 3 où nous présenterons nos travaux d'extension et d'amélioration de sa résolution et de sa vitesse de traçage (voir le schéma sur la figure 1.12a).

Bay et *al.* [35] ont utilisé dans leur système un modulateur réflectif LCOS¹², où leur plan d'insolation est le plan de *Fourier* du SLM. L'image résultante sur le substrat est la transformée de *Fourier* du SLM et elle est l'équivalent d'une image de 1080×1080 pixels de résolution de $3,5 \mu\text{m}$. L'inconvénient de cette technique est qu'il faut faire le calcul de transformée de *Fourier* de toutes les images avant de commencer l'insolation, ce qui demande beaucoup de temps afin d'avoir une image insolée avec un minimum d'erreurs.

1.4.2 Phototraçage parallèle à base des DMDs

Comme nous l'avons vu à la section 1.2, l'industrie de fabrication des microélectroniques est bien avancée dans le domaine de la photolithographie et de l'écriture directe grâce à la réduction des longueur d'onde de travail, les résolutions obtenues sont très inférieure au micromètre. L'écriture directe parallèle à base de modulateurs à cristaux liquides, souffre du désavantage que ces modulateurs sont endommagés par l'ultra-violet, ce qui nous empêche de descendre en longueur d'onde. La seule solution était de remplacer les modulateurs cristaux liquides par des modulateurs, par exemple à base de micro-miroir, pouvant fonctionner dans l'ultra-violet.

Seltmann et *al.* [39] ont fabriqué leur propre modulateur qui était une miroir visco-élastique de 512×464 pixels. Leur système était composé d'un laser XeCl-excimer de longueur d'onde $\lambda = 308 \text{ nm}$, d'une optique de réduction de $100 : 1$, et des platines de translations de vitesse 100 mm/s . Leur dimension critique était de $0.6 \mu\text{m}$ ce qui représente 3 pixels du modulateur.

Ljungblad et *al.* [38] ont choisi un modulateur fabriqué spécialement par *Fraunhofer Institute for Microelectronic Circuits and Systems*. Ce modulateur était une matrice de micro-miroirs numériques de 2048×512 pixels. L'insolation a été effectuée sous l'irradiation d'un laser excimer de longueur d'onde de $\lambda = 248 \text{ nm}$. Une lentille de projection de $160\times$ à été utilisée afin d'obtenir des insolutions de dimension critique de 320 nm avec un gap de 130 nm .

Chan et *al.* [42] ont décidé de choisir un autre type de modulateur et une autre source de lumière. Ils ont utilisé une lampe à arc de mercure avec un filtre laissant passer la longueur d'onde $\lambda = 435 \text{ nm}$ (G-line) afin d'illuminer un modulateur SVGA¹³ à base de micro-miroirs numériques de 848×600 pixels. Ils utilisent un système de micro-lentilles pour réduire la taille de pixels. La combinaison d'un système d'imagerie afocal $1 : 3$ avec les micro-lentilles et d'un deuxième système de projection de facteur $1 : 5$ leur procure une résolution d'écriture $1,5 \mu\text{m}$.

Martinsson et *al.* [37] ont dirigé leurs recherches vers le profond UV $\lambda = 193 \text{ nm}$. Avec un DMD de 2048×5120 pixels, ils ont pu démontrer qu'il sont

12. LCOS : Liquid crystal on silicon

13. SVGA : Super Video Graphic Array

capables de faire des lignes de dimensions 65, 45 et 35 nm. Mais il faut noter que le DMD utilisé est spécifique ayant des pixels de taille < 300 nm et il est très onéreux.

Gao et *al.* [43] ont utilisé la même technique d'écriture directe parallèle développée par d'autres laboratoires mais ils ont utilisé un DMD commercial de chez DLP¹⁴ comportant 1024×768 avec une source de lumière de longueurs d'ondes $\lambda = 436$ nm, 365 nm, entre 248 nm à 193 nm et 13 nm. Leur résolution était de 3 μm .

À Télécom Bretagne, Bialic et *al.* [5] et Kessels et *al.* [44] ont développé un phototraceur DMD. Le DMD utilisé de chez Texas Instruments de 1024×768 pixels a été illuminé par une lampe flash Xénon avec un filtrage sur la longueur d'onde $\lambda = 365$ nm. Les résultats obtenus avaient comme dimension critique 2-3 μm .

1.5 Conclusion

Cet état de l'art a permis de décrire brièvement les principales techniques lithographiques développées et exploitées à l'heure actuelle. Elles présentent toutes des avantages et des inconvénients. Pour cette raison, chacune a été privilégiée pour l'une ou l'autre application.

La photolithographie par masque présente le meilleur compromis coût-rapidité en production de masse. L'écriture directe, sachant qu'elle est lente, est reconfigurable et idéale pour la fabrication de photomasques et de composants prototypes. La nécessité du prototypage et de la production des petites séries de composant a abouti à la création de la photolithographie reconfigurable et parallèle. Cette technique qui est en cours de développement possède l'avantage de la rapidité et d'être reconfigurable en même temps.

Les travaux de ma thèse consistent à améliorer la technique de la photolithographie parallèle et reconfigurable. Les travaux sont divisés en trois parties : Développement d'un phototraceur massivement parallèle à haute résolution (1 μm) à base d'un modulateur spatial de lumière à cristaux liquides (Chapitre 3), développement d'un autre phototraceur à base de DMD (Chapitre 4) travaillant dans l'ultra-violet avec une résolution submicronique et une nouvelle technique qui consiste à combiner le phototraçage parallèle avec la polymérisation à deux photons (2PP¹⁵) dont l'état de l'art seront détaillés et la réalisation au chapitre 5. Avant d'aborder les améliorations et les travaux que j'ai effectués sur le phototraceur LCD existant à Télécom Bretagne, je me suis familiarisé avec les modulateurs spatiaux de lumière au début de ma thèse afin de pouvoir bien sélectionner le SLM le plus adapté dans chaque cas et d'optimiser son fonctionnement. Dans le chapitre 2, je détaille la structure des

14. DLP : Digital light processing

15. 2PP : Two-Photon Polymerization

modulateurs spatiaux de lumière et leurs différents types et je termine avec une expérience que j'ai effectuée sur un SLM de chez Holoeye. J'ai notamment reconfiguré ce modulateur, optimisé pour une longueur d'onde $\lambda = 633$ nm, afin qu'il soit optimisé pour une longueur d'onde $\lambda = 405$ nm.

Bibliographie

- [1] P. H. M. Lahmani, C. Dupas, *Les nanosciences, Nanotechnologies et nanophysique*, vol. 1. Saint-Just-la-Pendue : Belin, 004386-01 ed., 2006.
- [2] F. Schellenberg, “A little light magic [optical lithography],” *Spectrum, IEEE*, vol. 40, no. 9, pp. 34–39, 2003.
- [3] K. Ronse, “Optical lithography—a historical perspective,” *Comptes Rendus Physique*, vol. 7, no. 8, pp. 844 – 857, 2006. Ultimate lithography.
- [4] C. Reinhardt, S. Passinger, B. N. Chichkov, C. Marquart, I. P. Radko, and S. I. Bozhevolnyi, “Laser-fabricated dielectric optical components for surface plasmon polaritons,” *Opt. Lett.*, vol. 31, pp. 1307–1309, May 2006.
- [5] M. K. E. Bialic, “Phototraceur UV à micro-miroirs pour la réalisation de fonctions optiques intégrées et diffractives,”
- [6] L. A. Fernandes, J. R. Grenier, P. R. Herman, J. S. Aitchison, and P. V. S. Marques, “Femtosecond laser fabrication of birefringent directional couplers as polarization beam splitters in fused silica,” *Opt. Express*, vol. 19, pp. 11992–11999, Jun 2011.
- [7] H. Yanagawa, S. Nakamura, I. Ohyama, and K. Ueki, “Broadband high silica optical waveguide coupler,” in *Optical Fiber Communication*, p. WE4, Optical Society of America, 1990.
- [8] G. D. Marshall, M. Ams, and M. J. Withford, “Direct laser written waveguide-Bragg gratings in bulk fused silica,” *Optics Letters*, vol. 31, no. 18, pp. 2690–2691, 2006.
- [9] F. R. M. Adikan, C. B. E. Gawith, P. G. R. Smith, I. J. G. Sparrow, G. D. Emmerson, C. Riziotis, and H. Ahmad, “Design and demonstration of direct UV-written small angle x couplers in silica-on-silicon for broadband operation,” *Applied Optics*, vol. 45, no. 24, pp. 6113–6118, 2006.
- [10] H. Andersson, M. Ekberg, S. Hård, S. Jacobsson, M. Larsson, and T. Nilsson, “Single photomask, multilevel kinoforms in quartz and photoresist : Manufacture and evaluation,” *Appl. Opt.*, vol. 29, pp. 4259–4267, Oct 1990.
- [11] T. J. Suleski and D. C. O’Shea, “Gray-scale masks for diffractive-optics fabrication : I. commercial slide imagers,” *Appl. Opt.*, vol. 34, pp. 7507–7517, Nov 1995.

-
- [12] D. C. O'Shea and W. S. Rockward, "Gray-scale masks for diffractive-optics fabrication : Ii. spatially filtered halftone screens," *Appl. Opt.*, vol. 34, pp. 7518–7526, Nov 1995.
- [13] W. Däschner, P. Long, R. Stein, C. Wu, and S. H. Lee, "Cost-effective mass fabrication of multilevel diffractive optical elements by use of a single optical exposure with a gray-scale mask on high-energy beam-sensitive glass," *Appl. Opt.*, vol. 36, pp. 4675–4680, Jul 1997.
- [14] B. C. Kress and P. Meyrueis, *Applied digital optics : from micro-optics to nanophotonics*. John Wiley and Sons, Oct. 2009.
- [15] S. Obi, *Replicated optical microstructures in hybrid polymers : process technology and applications*. PhD thesis, Institute of Microtechnology, University of Neuchâtel, Switzerland, 2006.
- [16] P. Ehbets, "Continuous-relief fan-out elements with optimized fabrication tolerances," *Optical Engineering*, vol. 34, no. 12, pp. 3456–3463, 1995.
- [17] Y. Oppliger, P. Sixt, J. M. Stauffer, J. M. Mayor, P. Regnault, and G. Voirin, "One-step 3d shaping using a gray-tone mask for optical and microelectronic applications," *Microelectronic Engineering*, vol. 23, no. 1-4, pp. 449 – 454, 1994.
- [18] H. P. Herzig, *Micro-Optics : Elements, Systems And Applications*, ch. 3, pp. 53–85. Taylor & Francis, 1 ed., Apr. 1997.
- [19] M. Rothschild, "Projection optical lithography," *Materials Today*, vol. 8, no. 2, pp. 18 – 24, 2005.
- [20] R. Menon, A. Patel, D. Gil, and H. I. Smith, "Maskless lithography," *Materials Today*, vol. 8, no. 2, pp. 26 – 33, 2005.
- [21] T. Terasawa, "Subwavelength lithography (PSM, OPC)," in *Design Automation Conference, 2000. Proceedings of the ASP-DAC 2000. Asia and South Pacific*, pp. 295–300, 2000.
- [22] A. Wong, "Microlithography : trends, challenges, solutions, and their impact on design," *Micro, IEEE*, vol. 23, pp. 12 – 21, march-april 2003.
- [23] H. Yu, B. Li, and X. Zhang, "Flexible fabrication of three-dimensional multi-layered microstructures using a scanning laser system," *Sensors and Actuators A : Physical*, vol. 125, no. 2, pp. 553 – 564, 2006.
- [24] J. R. Salgueiro, V. Moreno, and J. L. nares, "Model of linewidth for laser writing on a photoresist," *Appl. Opt.*, vol. 41, pp. 895–901, Feb 2002.

- [25] H. Misawa, S. Juodkazis, A. Marcinkevicius, V. Mizeikis, A. Yamaguchi, H. Sun, and S. Matsuo, "Laser microfabrication/manipulation of dielectric materials," in *Micromechatronics and Human Science, 2000. MHS 2000. Proceedings of 2000 International Symposium on*, pp. 23–33, 2000.
- [26] N. Matsuzuka, Y. Hirai, and O. Tabata, "A novel fabrication process of 3D microstructures by double exposure in deep x-ray lithography," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, pp. 2056–2062, Nov. 2005.
- [27] S.-Y. Lee and K. Anbumony, "Analysis of three-dimensional proximity effect in electron-beam lithography," *Microelectronic Engineering*, vol. 83, no. 2, pp. 336–344, 2006.
- [28] T. Osipowicz, J. A. van Kan, T. C. Sum, J. L. Sanchez, and F. Watt, "The use of proton microbeams for the production of microcomponents," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B : Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 161-163, pp. 83–89, 2000.
- [29] M. T. Gale, M. Rossi, H. Schütz, P. Ehbets, H. P. Herzig, and D. Prongué, "Continuous-relief diffractive optical elements for two-dimensional array generation," *Appl. Opt.*, vol. 32, pp. 2526–2533, May 1993.
- [30] Y. M. Gueorguiev, K. G. Vutova, and G. M. Mladenov, "A monte carlo study of proximity effects in electron-beam patterning of high-*t_c* superconducting thin films," *Physica C : Superconductivity*, vol. 249, no. 1-2, pp. 187–195, 1995.
- [31] K. Yamazaki, T. Yamaguchi, and H. Namatsu, "Three-dimensional nano-fabrication with 10-nm resolution," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 43, no. 8B, pp. L1111–L1113, 2004.
- [32] Q. Peng, Y. Guo, S. Liu, and Z. Cui, "Real-time gray-scale photolithography for fabrication of continuous microstructure," *Opt. Lett.*, vol. 27, pp. 1720–1722, Oct 2002.
- [33] Q. Peng, S. Liu, Y. Guo, B. Chen, J. Du, Y. Zeng, C. Zhou, and Z. Cui, "Real-time photolithographic technique for fabrication of arbitrarily shaped microstructures," *Optical Engineering*, vol. 42, no. 2, p. 477, 2003.
- [34] H. Lin, B. Jia, and M. Gu, "Fast parallel fabrication of three-dimensional photonic crystals using the dynamic laser printing technique," in *Conference on Lasers and Electro-Optics*, p. CPDA4, Optical Society of America, 2010.

- [35] C. Bay, N. Hübner, J. Freeman, and T. Wilkinson, "Maskless photolithography via holographic optical projection," *Opt. Lett.*, vol. 35, pp. 2230–2232, Jul 2010.
- [36] R. P. Melanie V. Kessels, Marwa El Bouz and K. Heggarty, "Versatile stepper based maskless microlithography using a liquid crystal display for direct write of binary and multilevel microstructures," *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS*, vol. 6, pp. 033002–12, July 2007.
- [37] H. Martinsson, T. Sandstrom, A. Bleeker, and J. D. Hintersteiner, "Current status of optical maskless lithography," *Journal of Microlithography, Microfabrication, and Microsystems*, vol. 4, no. 1, p. 011003, 2005.
- [38] U. Ljungblad, U. Dauderstädt, P. Dürr, T. Sandström, H. Buhre, and H. Lakner, "New laser pattern generator for duv using a spatial light modulator," *Microelectronic Engineering*, vol. 57-58, pp. 23 – 29, 2001. Micro- and Nano-Engineering 2000.
- [39] R. Seltmann, W. Doleschal, A. Gehner, H. Kück, R. Melcher, J. Paufler, and G. Zimmer, "New system for fast submicron optical direct writing," *Microelectronic Engineering*, vol. 30, no. 1-4, pp. 123 – 127, 1996. Micro- and Nano-Engineering 95.
- [40] D. Gil, R. Menon, X. Tang, H. I. Smith, and D. J. D. Carter, "Parallel maskless optical lithography for prototyping, low-volume production, and research," vol. 20, pp. 2597–2601, AVS, 2002.
- [41] D. Elfström, B. Guilhabert, J. McKendry, S. Poland, Z. Gong, D. Mas-soubre, E. Richardson, B. R. Rae, G. Valentine, G. Blanco-Gomez, E. Gu, J. M. Cooper, R. K. Henderson, and M. D. Dawson, "Mask-less ultra-violet photolithography based on cmos-driven micro-pixel light emitting diodes," *Opt. Express*, vol. 17, pp. 23522–23529, Dec 2009.
- [42] K. F. Chan, Z. Feng, R. Yang, A. Ishikawa, and W. Mei, "High-resolution maskless lithography," *Journal of Microlithography, Microfabrication, and Microsystems*, vol. 2, no. 4, p. 331, 2003.
- [43] Y. Gao, T. Shen, J. Chen, N. Luo, X. Qi, and Q. Jin, "Research on high-quality projecting reduction lithography system based on digital mask technique," *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 116, no. 7, pp. 303 – 310, 2005.
- [44] M. Kessels, C. Nassour, P. Grosso, and K. Heggarty, "Direct write of optical diffractive elements and planar waveguides with a digital micromirror

device based uv photoplotter,” *Optics Communications*, vol. 283, no. 15, pp. 3089 – 3094, 2010.

Chapitre 2

Caractérisation des modulateurs spatiaux de lumière

Le modulateur spatial de lumière (SLM) est l'élément clé dans la technique de phototraçage parallèle. Avant de détailler nos travaux sur la technique de photolithographie parallèle des les chapitres 3 et 4, j'introduis dans ce chapitre les modulateurs spatiaux de lumières en général et je détaille ceux basés sur les cristaux liquides et ceux basés sur des micro-miroirs.

Dans la section 2.1 je présente les différents types de SLM, puis j'introduis dans la section 2.2.1 les cristaux liquides afin de présenter dans la section 2.2.2 les modulateurs spatiaux de lumière à base des cristaux liquides. J'illustre l'utilisation des SLM par la caractérisation d'un SLM *Holoeye* à base des cristaux liquides (section 2.4) afin de l'optimiser pour le phototraçage parallèle.

En fin de chapitre je montre dans la section 2.3 l'architecture d'un SLM à base des micro-miroirs.

2.1 Modulateurs spatiaux de lumière (SLM)

Un modulateur spatial de lumière, comme son nom l'indique, module spatialement une onde lumineuse incidente. Les SLM peuvent être représentés par une diapositive ou un transparent sur un rétroprojecteur ou aussi toute image imprimée fonctionnant en réflexion, mais contrairement aux exemples donnés précédemment les SLMs n'affichent pas une image fixe. La figure 2.1 montre une illustration du fonctionnement des SLM.

L'application «grand public» la plus courante des SLMs se trouve chez les afficheurs, les vidéoprojecteurs et les écrans plats à cristaux liquides. Les technologies CRT¹, Plasma, et LED² ne sont pas des SLM car ce sont des sources de lumière alors qu'un SLM reçoit une onde lumineuse qu'il module. Les pro-

1. CRT : Cathode Ray Tube

2. LED : Light Emitting Diode

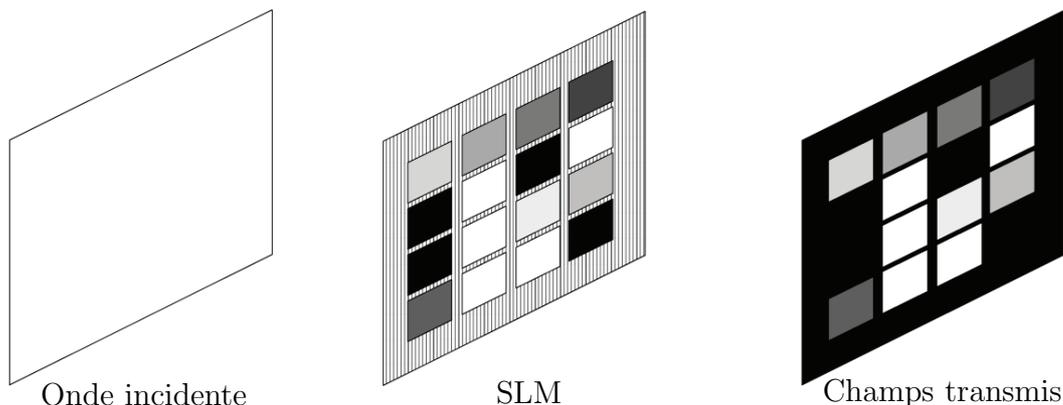


FIGURE 2.1 – Schéma illustratif du fonctionnement d'un SLM.

jecteurs classiques à pellicule qui sont utilisés dans les cinéma ne sont pas non-plus des SLMs car ils possèdent une séries d'images fixes qui se déroulent.

La technologie des SLM est relativement jeune et n'apparait de manière commerciale que vers la fin des années 1980. De nos jours, nous trouvons les SLMs dans différents applications dans le domaine d'affichage, mais aussi dans des applications hors affichage, à titre d'exemple le traitement optique de l'information, les mémoires holographiques, l'affichage holographique 3D, l'analyse de faisceau, la photoinscription parallèle.

Avant de choisir un modulateur pour l'intégrer dans notre application de phototraçage parallèle, il faut comparer leur caractéristiques.

2.1.1 Caractéristiques principales des SLM

Il existe plusieurs caractéristiques pour les SLM, mais leur importance change en fonction de l'application du SLM. Parmi les applications des SLM cités ci-dessus, la modulation de la lumière peut être une modulation d'amplitude ou une modulation de phase. Pour les applications considérés dans cette thèse, nous aurons besoin de la modulation d'amplitude uniquement. Dans ce qui suit, nous présentons les critères les plus importants pour nos applications.

Nombre des pixels

Dans l'application du phototraçage parallèle, plus le nombre de pixels augmente, plus la vitesse du phototraçage augmente. On cherche donc toujours à augmenter le nombre de pixels des SLM, mais en contre partie plus le nombre de pixels augmente plus la vitesse de transfert de données vers le SLM devient problématique. Alors que les premiers SLM ne possédaient que 100×100 pixels, grâce au développement récent des afficheurs TVHD³, des SLM comportant approximativement 2000×1000 pixels deviennent de plus en plus communs.

3. Télévision Haute définition

Taille des pixels

Contrairement à l’affichage, où l’on recherche des téléviseurs et des moniteurs de plus en plus grands, dans les applications de photoraçage parallèle nous cherchons des SLM de plus en plus petits comportant des pixels de plus en plus petits afin de simplifier l’optique de projection et d’augmenter la résolution des structures photoinscrites. Ici aussi il existe un compromis entre la taille des pixels et le circuit de pilotage qui se trouve dans la zone inter-pixels. Ce compromis détermine le taux de remplissage du SLM. Plus le taux de remplissage augmente, plus l’efficacité énergétique optique du SLM augmente. De nos jours les constructeurs des SLM fabriquent des SLM où le taux de remplissage est supérieur à 90% avec des pixels de pas $\sim 10 \mu\text{m}$.

Type de modulation

La modulation la plus répandue est la modulation d’amplitude, poussée par l’industrie de l’affichage en utilisant la technologie MEMS (micro-miroirs) ou des SLM à base de cristaux liquides qui modulent la polarisation et produisent une modulation d’amplitude à l’aide d’un polariseur et d’un analyseur. Avec des SLM à cristaux liquides on peut aussi moduler la polarisation, la phase, ou la combinaison de la modulation d’amplitude et de la phase [1].

Contraste

Le contraste est le rapport entre l’énergie de l’onde transmise par un pixel en état allumé “ON” et l’énergie transmise par un pixel en état éteint “OFF”. Nous cherchons toujours un meilleur contraste, et actuellement les constructeurs fournissent des SLM avec un contraste allant jusqu’à 1 : 1000. Le contraste est mesuré pour les valeurs binaires du SLM, mais parfois nous sommes intéressés par des états intermédiaires, à titre d’exemple 256 niveaux de gris. La modulation de niveau de gris est souvent non-linéaire et afin de la linéariser, nous utilisons la majorité du temps une table de correspondance [2] (LUT⁴).

Réponse spectrale

La position et la largeur du domaine spectral d’opération d’un SLM est également un critère très important. Pour des applications dans le domaine visible comme l’affichage, il suffit d’utiliser des SLM couvrant le domaine visible (400 \sim 700 nm). Pour d’autres applications comme le phototraçage, nous avons parfois besoin d’utiliser des longueurs d’onde qui se situent dans le domaine ultra-violet, mais ce type de modulateur n’est pas en général accessible par le «grand public».

4. LUT : Look up table

Temps de réponse

La persistance des images sur la rétine fait que l'œil ne peut pas distinguer des images individuelles à des cadences dépassant les 30 images/s. Il suffit d'avoir une cadence de vidéo ~ 50 images/s dans le domaine d'affichage pour que l'œil ne distingue pas les images. Dans l'application de phototraçage, nous avons besoin d'une cadence de plus en plus rapide et un temps de réponse de plus en plus petit. En termes de temps de réponse, il existe deux grandes catégories de SLM :

1. Les SLM à cristaux liquides nématiques qui ont un temps de réponse de l'ordre de 10 ms et un taux de rafraîchissement de ~ 100 Hz.
2. Les SLM MEMS ou les SLM à cristaux liquides ferroélectriques qui ont un temps de réponse $10 \mu s \sim 100 \mu s$ et un taux de rafraîchissement de quelques kHz.

La différence entre ces deux catégories de SLM est que les SLM à cristaux liquides nématiques peuvent afficher les niveaux de gris directement mais les autres SLMs sont fondamentalement binaires et affichent des niveaux de gris par la technique de multiplexage temporel, ce qui les rend souvent moins efficaces que les cristaux liquides nématiques.

Interface électronique - Informatique

La définition des SLM récents ayant largement dépassé le million de pixels, la nécessite un port de transfert de données qui supporte des taux de transfert de l'ordre de 1 Gbit/s.

Les SLM à cristaux liquides ferroélectriques et les MEMS sont souvent pilotés par des ordinateurs à travers des ports USB, PCI, ou des autres ports spécialisés ayant une vitesse de transfert de données élevées. Les SLM à cristaux liquides nématiques ayant une fréquence d'affichage allant jusqu'à 100 Hz, ils sont souvent connectés à des cartes graphiques en tant que des micro-écran via les ports VGA, DVI, ou HDMI à une cadence vidéo allant jusqu'à 100 Hz. Une carte graphique bon marché et ayant une cadence adaptée au modulateur est souvent choisie pour ce type de composant.

2.1.2 Les différentes technologies de SLM

Il existe plusieurs types de technologies de SLM. Notre but ici n'est pas d'être exhaustif mais simplement d'indiquer les grandes familles et leurs avantages et inconvénients, particulièrement les applications en relation directe avec le phototraçage. Plus de détails sur les modulateurs spatiaux de lumière se trouvent à la référence [3].

Le SLM magnéto-optique [4] fut l'un des premiers SLM disponibles commercialement. Ce type de modulateur tourne la polarisation de la lumière par

l'application d'un champs magnétique (effet *Faraday*) sur un grenat de fer. Ces modulateurs ont été abandonnés avec l'apparition des modulateurs à cristaux liquides et les MEMS, en raison de leur faible efficacité optique.

Les modulateurs à puits quantiques [3, 5, 6] utilisent les effets électro-optiques dans des structures à multiples puits quantiques de matériaux semi-conducteurs, souvent l'AsGa. Ces modulateurs ont un taux de rafraichissement très élevé qui peut monter à plusieurs centaines de kHz, voire à quelques MHz. Cependant il est très difficile de commercialiser une telle technologie pour le grand public, car le nombre de pixels reste limité à 100×100 et leur coût de fabrication est très élevé. Cette technologie a été mise de côté, car elle reste très peu mûre, comparée aux modulateurs à cristaux liquides et les MEMS.

Les modulateurs magnéto-optiques, les modulateurs à puits quantiques, les modulateurs à cristaux liquides et les MEMS sont commandés électriquement. Cependant il est également possible d'adresser des modulateurs optiquement. Les modulateurs adressés optiquement [7–10] sont illuminés par une distribution lumineuse (image) qui peut être enregistrée dans le composant et relue par un autre faisceau éventuellement à une autre longueur d'onde. Le développement de ces modulateurs est fortement ralenti faute d'une application grand public et par manque de fournisseurs industriels.

En conclusion, les deux grandes familles de modulateurs spatiaux de lumière considérés sont à cristaux liquides (présentés dans la section 2.2) et à MEMS (section 2.3).

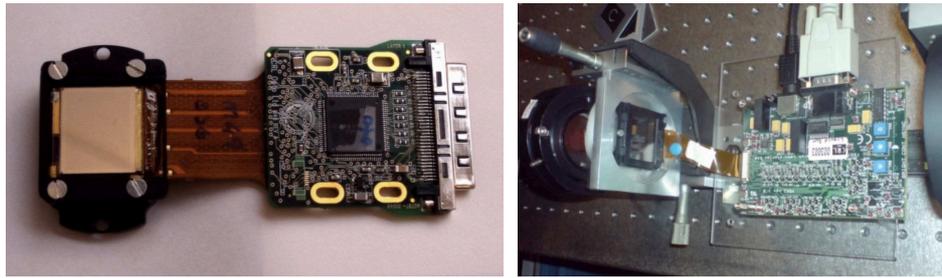
2.2 Modulateurs spatiaux de lumière (SLM) à cristaux liquides

Dans le chapitre 3 où je montre les travaux effectués sur l'amélioration d'un phototraceur LCD, j'utiliserai un SLM à cristaux liquides en mode de transmission, comme le montre l'exemple de la figure 2.2b. Avant d'aborder le phototraçage parallèle à base des SLM cristaux liquides, j'introduis dans ce qui suit les cristaux liquides et je montre la caractérisation d'un SLM *Holoeye* en mode reflectif, comme le montre la figure 2.2a.

2.2.1 Cristaux liquides

Les solides sont caractérisés par une certaine dureté mécanique et un arrangement moléculaire ordonné. Du fait de cet arrangement ordonné, les solides peuvent présenter des propriétés physiques anisotropes par exemple des anisotropies optiques liées à des différences d'indices, ou des anisotropies diélectriques dues à des permittivités diélectriques non symétriques.

Les liquides quant à eux n'ont pas d'arrangement ordonné. Leurs molécules sont placées aléatoirement les unes à coté les autres dans un désordre statis-



(a) Un SLM à cristal liquide ferroélectrique de chez *CRL Opto* en mode réflexion, de définition 1280×1024 pixels, et de résolution de $13 \mu\text{m}$.

(b) Un SLM à cristal liquide nématique twisté de chez *CRL Opto* en mode transmission, de définition 640×480 pixels, et de résolution de $42 \mu\text{m}$.

FIGURE 2.2 – Les deux types de configurations des SLM à cristaux liquides.

tique. Une faible viscosité leur permet de prendre la forme de leur contenant et les caractéristiques physiques sont isotropes.

Les cristaux liquides [11–14] sont des composés généralement organiques complexes qui présentent l'aspect et la faible viscosité d'un liquide et en même temps les anisotropies physiques semblables aux solides.



Nématique

Smectiques A

Smectiques C

Cholestériques

FIGURE 2.3 – Schéma illustratif du fonctionnement des SLM.

Les cristaux liquides sont classés en trois grandes phases distinctes : les nématiques, les cholestériques et les smectiques comme l'indique la figure 2.3. Les molécules de cristaux liquides se présentent généralement sous une forme allongée et relativement plane. Elles possèdent une distribution non uniforme des charges électriques, produisant un moment dipolaire. Les nématiques peuvent glisser entre eux dans la direction du grand axe des molécules, sachant que les grands axes sont quasiment parallèles entre eux. En outre, les molécules des smectiques sont organisées en couches parallèles successives avec un es-

pace intercouche et ils sont divisés en deux groupes : les smectiques A et les smectiques C dont la phase C* est ferroélectrique⁵. Les cholestériques ont une structure en couches comme les smectiques, mais ils présentent en plus une structure torsadée.

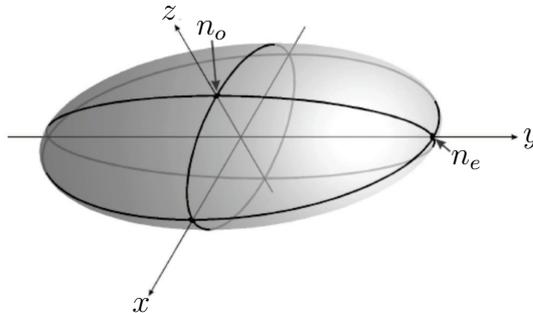


FIGURE 2.4 – Ellipsoïde des indices de réfraction d’une molécule de cristal liquide.

D’un point de vue macroscopique, l’anisotropie optique du cristal liquide sera caractérisée par son ellipsoïde des indices. Le milieu biréfringent⁶ uniaxe positif ($n_e > n_o$) est schématisé par l’ellipsoïde des indices de la figure 2.4. Une onde lumineuse incidente sur ce matériau verra donc un indice qui dépendra de sa direction de propagation et de son état de polarisation. Ainsi sur la figure 2.4, l’indice de réfraction ordinaire, n_o , est rencontré par une onde lumineuse dont le champ électrique oscille perpendiculairement au grand axe de la molécule. L’indice de réfraction extraordinaire principal, n_e , correspond à l’indice de réfraction d’une onde lumineuse polarisée linéairement dont le champ électrique oscille parallèlement au petit axe de la molécule.

2.2.2 SLM à cristaux liquides nématiques

Deux phases de cristaux liquides sont utilisés pour les SLM à cristaux liquides : nématique et smectique.

Avant de détailler une cellule à cristaux liquides, nous rappelons les temps de réponse des SLM cités ci-dessus ; un SLM nématique [15] a un temps de réponse τ compris entre 10 et 50 ms et celui des ferroélectriques est compris entre 100 et 500 μ s. Toutefois un SLM nématique a le pouvoir d’afficher des niveaux de gris, ce que les ferroélectriques ne peuvent pas directement réaliser (c’est le prix à payer pour la rapidité).

5. Elle possède une polarisation électrique spontanée susceptible d’interagir avec un champ électrique extérieur.

6. La biréfringence ou anisotropie optique est caractérisée par la différence entre l’indice extraordinaire et l’indice ordinaire $\Delta n = n_e - n_o$.

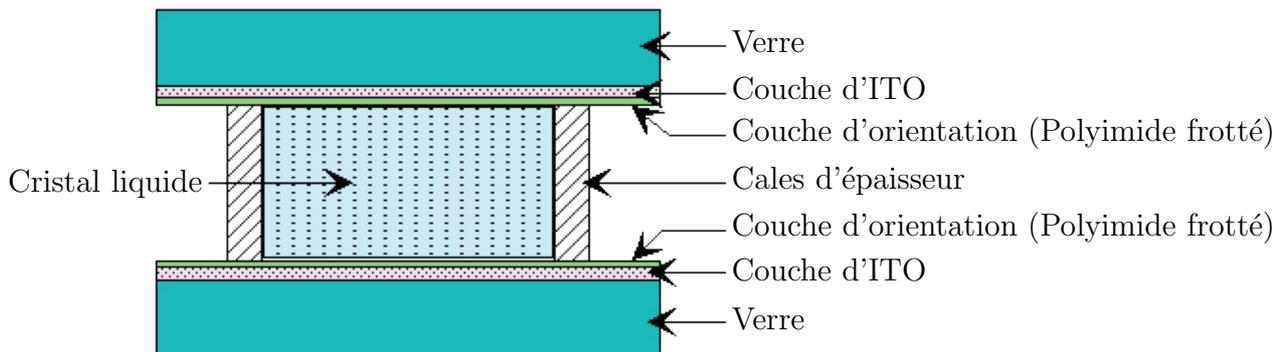


FIGURE 2.5 – Représentation en coupe d'un pixel cristallin liquide en transmission.

Conformément à la figure 2.5, la cellule d'un SLM est constituée de deux plaques de verres, distantes d'une dizaine de micromètres. Ces plaques sont recouvertes d'une mince couche d'oxyde d'indium et d'étain (ITO), ce dernier est un conducteur transparent utilisé comme électrode pour amener les tensions de commande au niveau du cristal liquide. Une fois recouvertes d'une couche d'ITO, les plaques sont enduites d'une mince couche de polymère, généralement du polyimide, dont la surface est traitée mécaniquement par frottement pour que les molécules du cristal liquide s'alignent dans la direction du frottement. Dans la suite, nous allons utiliser les cristaux liquides nématiques en hélice dans le cas de notre étude. Pour obtenir des cellules de cristaux liquides nématiques en hélice, il faut frotter l'une des plaques dans la direction de 90° par rapport à l'autre. Par conséquent, les molécules du cristal liquide nématique s'aligneront avec la nouvelle direction pour donner une cellule de cristal liquide nématique en hélice [16] (Figure 2.6).

Pour obtenir l'effet optique du SLM désiré (modulation d'amplitude) à partir de sa biréfringence, il faut mettre de part et d'autre du SLM un polariseur et un analyseur avec un angle de 90° entre eux.

L'application d'un champ électrique aux bornes de cristal liquide aligne les molécules parallèlement à ce champ. Notons qu'il faut que la tension appliquée V se situe entre V_T et V_{sat} , V_T étant la tension pour vaincre les forces élastique de la structure nématique, et V_{sat} la tension de saturation où les molécules s'alignent en parallèle au champ \vec{E} mais les molécules des couches périphériques restent parallèles aux parois (Figure 2.7). Afin d'avoir des niveaux de gris en affichage il faut enfin que la tension V appliqué soit $V_T < V < V_{sat}$.

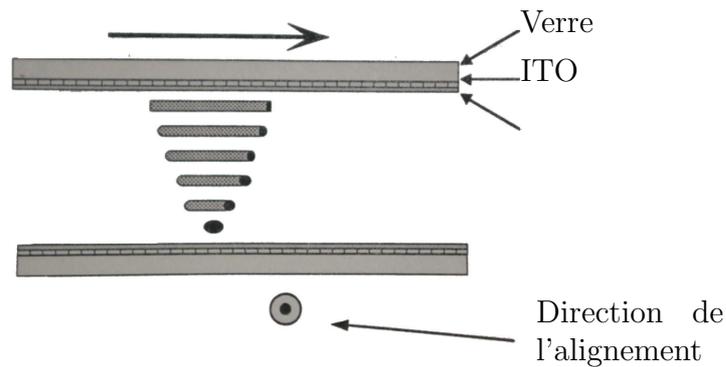


FIGURE 2.6 – Représentation en coupe d'un pixel contenant un cristal liquide nématique en hélice [16].

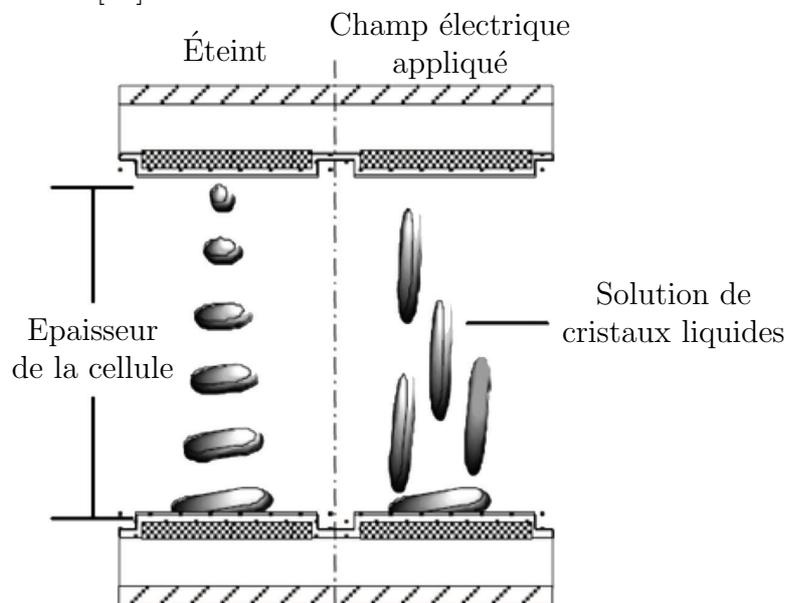


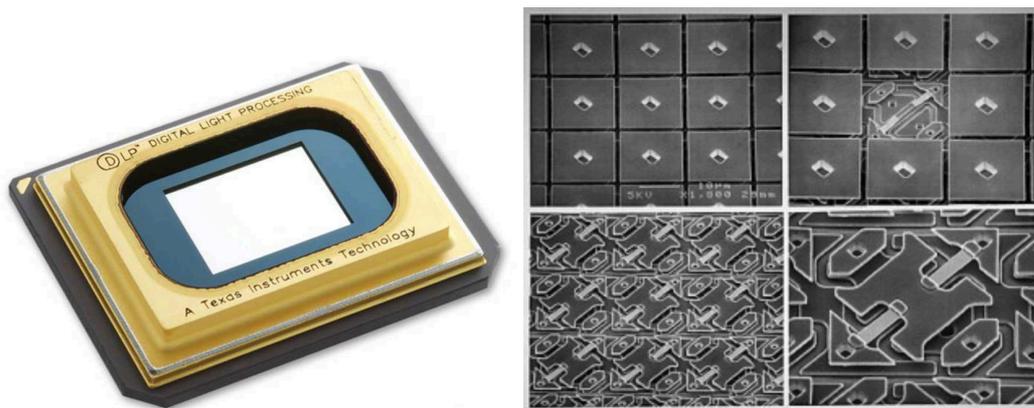
FIGURE 2.7 – Représentation en coupe d'une cellule d'un cristal liquide nématique en hélice : comparaison des positions des molécules en présence d'un champ électrique (à droite) et non (à gauche).

2.3 Digital Micro-mirror Device (DMD)

Les MEMS⁷ [17] sont des systèmes micro-mécaniques, ils sont fabriqués à partir de et sur un substrat silicium à l'aide de la technique très mûre de la photolithographie pour micro-électronique. L'application de tensions électriques sur le circuit silicium sur lesquels ces systèmes sont construits permet d'actionner les parties micro-mécaniques à des fréquences très élevées (quelque kHz).

7. MEMS : Micro-Electro-Mechanical Systems

La fabrication des SLM à base des MEMS est réalisée en rajoutant des micro-miroirs⁸ [18] sous des différentes configurations. Les miroirs orientable continument suivant une direction et les miroirs «3D» orientables selon 2 directions ont été utilisés pour les applications en communication de signaux de télécommunications optiques [19]. Les miroirs déformables [20] sont constitués d'une membrane réfléchissante où l'on applique localement des tensions afin de moduler en phase l'onde réfléchi. Les miroirs déformables sont utilisés notamment dans les applications de correction de front d'onde [21].



(a) Un exemple d'un SLM à DMD de chez Texas Instruments. Nous avons utilisé ce type de modulateur dans notre phototraceur UV qui sera détaillé dans le chapitre 4
 (b) Photographie illustrative de la structure d'une puce DMD à l'aide d'un microscope électronique.

FIGURE 2.8 – Un exemple d'un DMD de 1024×768 pixels de résolution $13,68 \mu\text{m}$ montré dans la figure 2.8a avec une photo des miroirs prise à l'aide d'un microscope dans la figure 2.8b

La configuration des MEMS la plus développée et appliquée en tant que des SLM est celle de puce DMD⁹. Le plus grand fabricant des DMD est *Texas Instruments* (figure 2.8a).

Les principaux avantages des DMD sont leur taux de rafraichissement qui peut monter jusqu'à quelques kHz, le contraste très élevé du à la réflexion, les puissances optiques maximales élevés supportés de quelques Watts, et la couverture spectrale qui couvre le champ visible et qui peut être optimisé également pour l'infra-rouge et l'ultra-violet. *Texas Instruments* déclare que ses composants DMD se trouvent dans plus que 50% des projecteurs vidéo vendus dans le monde.

La figure 2.8b montre une photo prise par un microscope électronique des micro-miroirs du composant DMD fabriqué par *Texas Instruments* montré sur

8. MOEMS : Micro-Opto-Electronic Mechanical Systems

9. DMD : Digital micro-mirror device

la figure 2.8a. Ce DMD est formé par des micro-miroirs fixés sur des MEMS qui pivotent sur un seul axe à haute fréquence et le long de la diagonale des miroirs. Pour cette raison la mise en place du système optique comprenant un DMD est souvent compliqué : nous devons illuminer ce DMD sous un angle d'incidence de 12° à la verticale et à 45° de l'axe de la matrice des micro-miroirs.

Dans nos applications de phototraçage, nous sommes intéressés par la fabrication d'éléments optique diffractifs multiniveaux, ce qui nécessite un dosage bien contrôlé de l'énergie lumineuse. Cependant les DMD n'affichent directement que des images binaires, donc la fabrication des composants multiniveaux ralentit le phototraçage. Nous notons aussi que par à un manque de concurrence sur la fabrication des composant DMD, les prix des DMD de *Texas Instruments* reste élevé surtout en petites quantités. Leur programme de pilotage logiciel reste fermé et propriétaire.

2.4 Caractérisation d'un SLM *Holoeye*

Pour me familiariser avec les modulateurs spatiaux de lumière et la technique de photoinscription, mais aussi pour évaluer le modulateur pour des applications sur la photorésine, j'ai caractérisé et effectué un montage optique à base d'un SLM de chez *Holoeye*. Le but de ces expériences était de graver un réseau sinusoïdal sur une couche de photorésine déposée sur un substrat de verre. La photorésine n'étant pas photosensible au laser de longueur d'onde $\lambda = 633$ nm pour lequel le SLM était optimisé. j'ai du optimiser l'opération du SLM afin d'utiliser un laser violet $\lambda = 405$ nm où la photorésine est sensible .

2.4.1 Montage optique

Nous avons mis en place le montage montré sur la figure 2.9. La technique d'optimisation consiste à linéariser la puissance lumineuse réfléchié par le SLM par rapport au niveaux de gris affichés. Nous avons ainsi établi une nouvelle table de correspondance qui sera détaillé dans la suite.

Source Lumineuse

Nous avons utilisé un laser de chez *Power Technology* comme source lumineuse, émettant une lumière de longueur d'onde $\lambda = 405$ nm et de puissance maximale $P_0 = 60$ mW.

Collimation du faisceau

Pour filtrer et adapter la taille du faisceau laser, nous avons utilisé un objectif de microscope $20\times$ avec une ouverture numérique de 0,5 à la sortie du

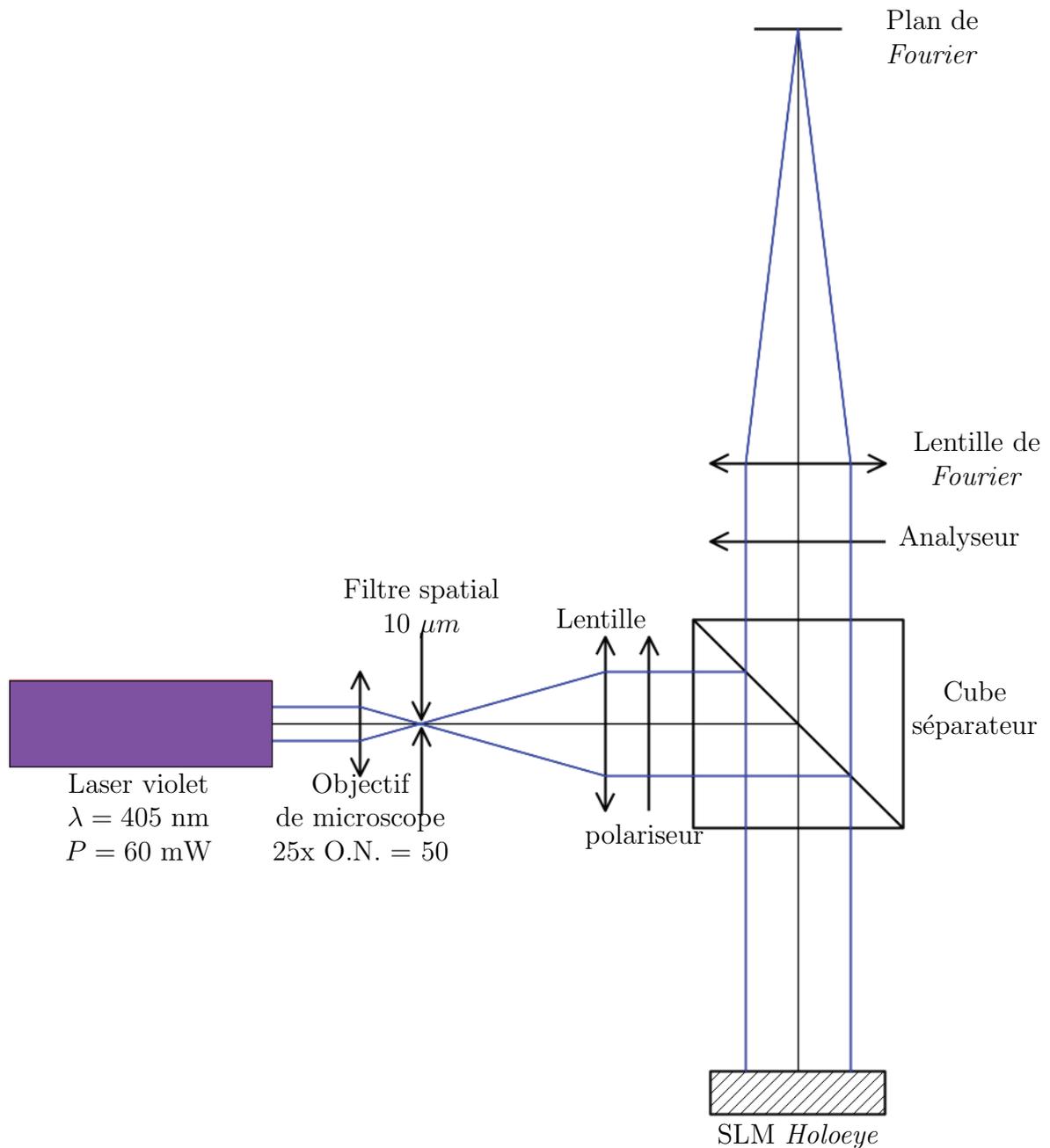


FIGURE 2.9 – Représentation du montage optique mis en place pour la caractérisation du SLM Holoeye.

laser afin de focaliser le faisceau sur un trou calibré de $10 \mu\text{m}$. Pour collimater le faisceau divergent à la sortie du filtre spatial, nous avons utilisé une lentille convergente de focale $f = 30 \text{ cm}$, focalisé sur le trou calibré.

Polarisation

Notre expérience consiste à moduler l'amplitude du faisceau, ce qui implique l'utilisation de deux polariseurs croisés, un avant le SLM et l'autre après. La configuration du SLM nous impose que le polariseur d'entrée soit linéaire et forme un angle de 0° avec la verticale. L'analyseur de sortie est également un polariseur linéaire et forme un angle 90° avec la verticale. Nous avons mis en place un cube séparateur polarisant qui réfléchit la polarisation verticale et transmet la polarisation horizontale.

SLM *Holoeye*

HOLOEYE a indiqué que le SLM utilise des cristaux liquides alignés verticalement sans aucun film supplémentaire. Lorsque aucune tension n'est appliquée, cela donne un milieu homogène et il n'y a pas de rotation de la polarisation de la lumière collimatée. Lorsqu'une tension est appliquée, la rotation de la polarisation dépend de l'orientation de la polarisation d'entrée et de la tension appliquée.

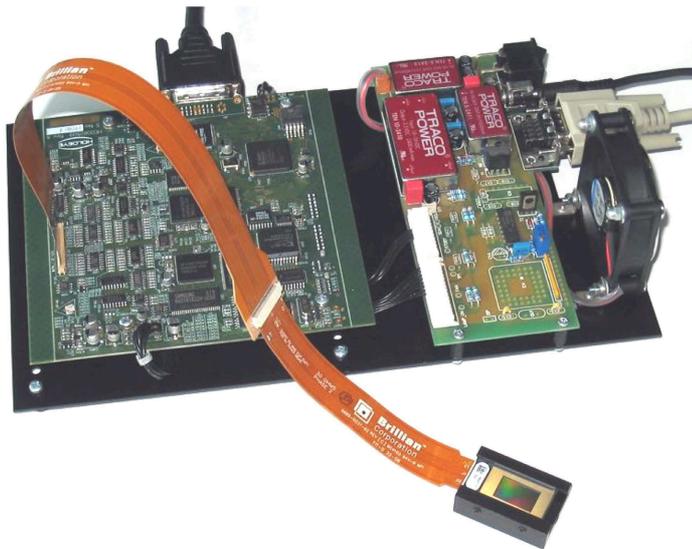


FIGURE 2.10 – Photo du SLM *Holoeye* utilisé dans le montage optique.

Le SLM *Holoeye* (figure 2.10) est une matrice active de LCoS¹⁰ WUXGA¹¹. Il fonctionne en mode réflectif avec 1920×1200 pixels sur un pas de $8,1 \mu\text{m}$. Il affiche 256 niveaux de gris et possède également une connexion DVI¹². Nous avons commandé ce modulateur à l'aide d'une librairie SDL [22] sous Windows.

10. LCoS : Liquid Crystal on Silicon

11. WUXGA : Widescreen Ultra eXtended Graphics Array

12. DVI : Digital Video Interface

Plan de *Fourier*

Afin de matérialiser la transformée de *Fourier* du SLM nous avons utilisé une lentille convergente de focale 1 m à la sortie de l'analyseur. Nous nous sommes servis de ce plan pour mesurer les puissances réfléchies par le SLM.

2.4.2 Caractérisation du SLM *Holoeye*

L'application d'un champ électrique sur une cellule de cristal liquide change l'alignement des molécules de cristaux liquides et ainsi l'ellipsoïde des indices change par rapport à la lumière incidente. Le SLM *Holoeye* possède une connexion RS232 (port série) qui permet d'accéder à la configuration des tensions appliquées sur les pixels du SLM. Avant d'effectuer un changement sur les tensions appliquées sur les pixels, nous avons mesuré la puissance lumineuse réfléchi par le SLM pour tous les niveaux de gris affichés sur le SLM. Nous avons obtenu le graphique 2.11 pour la réponse en réflexion du faisceau par rapport au chaque niveau de gris affiché.

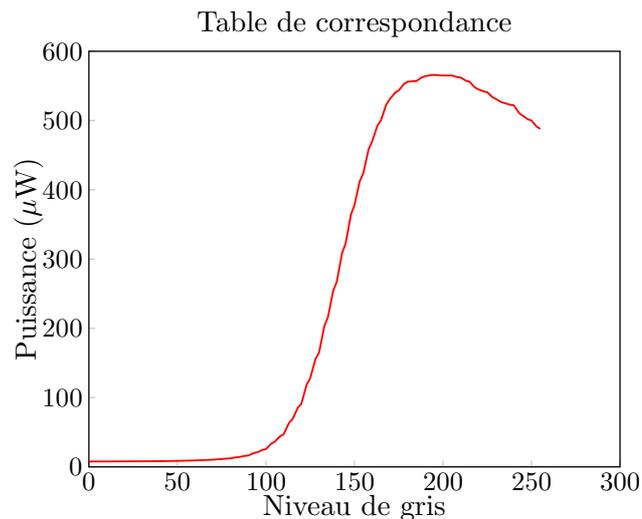


FIGURE 2.11 – Graphique de la puissance du faisceau lumineux réfléchi en fonction de chaque niveau de gris avant le changement de la table de correspondance.

Le graphique 2.11 montre une relation fortement non-linéaire de la réponse du SLM en fonction du niveau de gris demandé : La réflectivité est nulle pour les niveau de gris plus petit que 100, puis elle croit de façon rapide jusqu'au niveau de gris 200 et baisse à partir de ce seuil. La réponse linéaire désirée avec ce SLM était linéaire : nous ne souhaitons pas avoir une réflexion pour le niveau de gris 0, et nous devons avoir une réflexion maximale pour le niveau de gris 255, et des coefficients de réflexion intermédiaires proportionnels pour les niveaux de gris entre 0 et 255.

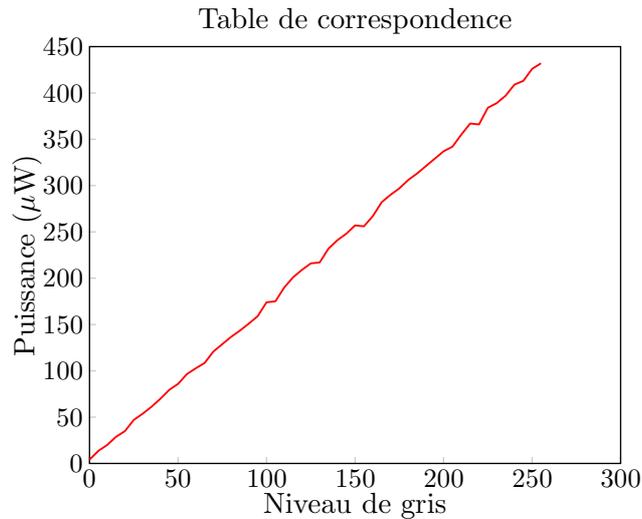


FIGURE 2.12 – Graphique de la puissance du faisceau lumineux réfléchi en fonction de chaque niveau de gris après le changement de la table de correspondance.

Comme déjà indiqué précédemment le SLM *Holoeye* possède une connexion RS232 qui donne accès à la configuration des tensions du champ électrique appliqué sur les pixels. Nous avons récupéré les valeurs des tensions initialement configurées sur ce SLM, optimisées pour la longueur d'onde $\lambda = 633$ nm. Nous avons changé ces valeurs afin d'obtenir une nouvelle table de correspondance entre la valeur du champ appliqué sur les pixels et la rotation des cellules des cristaux liquides, formant une courbe de niveau de gris linéaire dans le violet ($\lambda = 405$ nm). Les mesures après optimisation sont montrés sur le graphique 2.12. Nous remarquons que la nouvelle table de correspondance fournit une réponse linéaire des niveaux de gris.

2.4.3 Insolation d'un réseau sinusoïdal

Afin de graver un réseau sinusoïdal dans de la photorésine, nous avons tout d'abord affiché un réseau binaire sur le SLM. Ensuite, nous avons filtré dans le plan de *Fourier* (figure 2.13) les ordres supérieurs de diffraction et l'ordre zéro afin d'obtenir deux taches aux ordres $+1$ et -1 , représentant la transformée de *Fourier* d'un réseau sinusoïdal. Le plan de *Fourier* dans le montage que nous avons mis en place est situé à une distance de 1 m de la lentille de *Fourier*, où nous passons uniquement les ordres $+1$ et -1 . La transformée de *Fourier* des deux ordres (deux *Dirac*) est un réseau sinusoïdal qui se situe dans ce montage à 1 m du plan de filtrage. A cette distance nous avons placé un substrat où nous avons déposé de la photorésine positive *Shipley S1805*, avec une épaisseur de 600 nm. L'insolation de ce substrat est montré sur la figure 2.14 confirmant la faisabilité de cette technique de photoinscription des

réseaux sinusoïdaux à pas variable par SLM et particulier le bon contraste de l’affichage sur le SLM.

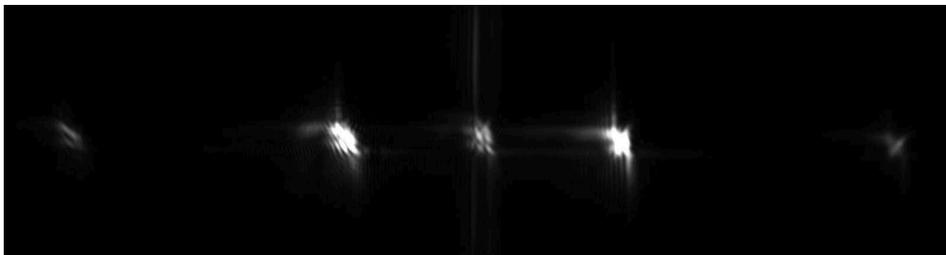


FIGURE 2.13 – Photo du plan de diffraction d’un SLM quand on y affiche un réseau binaire horizontal de pas de 50 pixels. Nous remarquons que l’ordre zéro est faible mais existe toujours même avec l’optimisation du SLM. Cet ordre zéro résiduel est dû aux espaces interpixels non-modulés. Par contre, nous avons quasiment éliminé tous les ordres supérieurs.

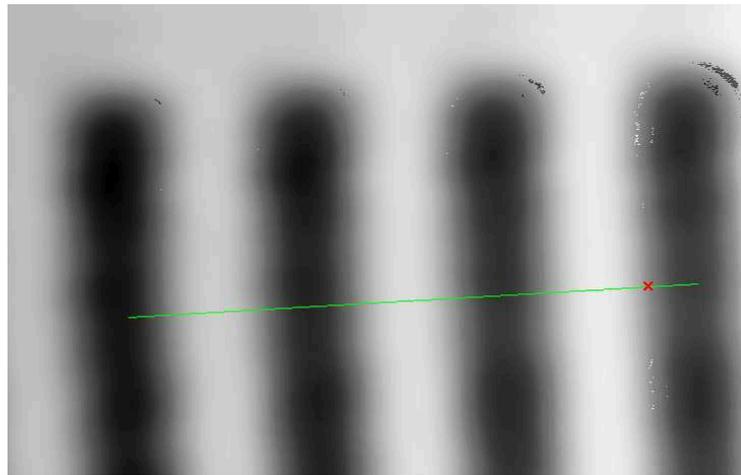
2.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons introduit les modulateurs spatiaux de lumière, leurs caractéristiques et les différents types existant. Pour les travaux de ma thèse nous sommes intéressés par deux types de SLM : les SLM à cristaux liquides et les MEMS à base de DMD.

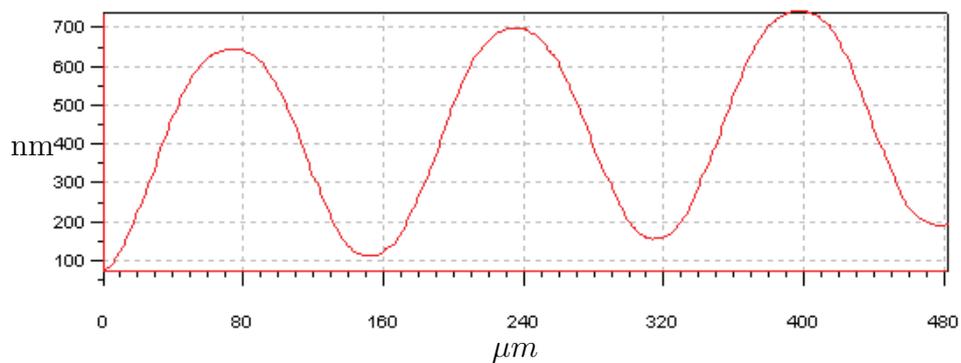
Dans le chapitre 3 je montre les travaux que j’ai effectués sur le phototraceur LCD existant au département optique de Télécom Bretagne. J’ai remplacé le micro écran LCD de ce phototraceur afin d’améliorer la résolution et le contraste et la vitesse de traçage. Pour effectuer ce changement, j’ai dû maîtriser les SLM à cristaux liquides et la technique de la photolithographie. Afin de faire les premiers tests de photoinscription dans la photorésine, j’ai réalisé un montage optique où j’ai utilisé un SLM *Holoeye* à base de cristaux liquides nématique initialement configuré pour fonctionner à la longueur d’onde $\lambda = 633$ nm. La photorésine est photosensible aux longueurs d’onde allant du bleu jusqu’au ultra-violet. C’est la raison pour laquelle j’ai utilisé un laser violet avec une longueur d’onde $\lambda = 405$ nm, et j’ai également modifié la configuration du SLM afin d’obtenir une modulation d’amplitude optimisée pour le violet.

Ces premiers tests ont confirmé la faisabilité de la technique de réalisation de réseaux sinusoïdaux submicroniques à pas variable par un filtrage de *Fourier* d’une image affichée sur un SLM.

Cette technique d’optimisation de l’opération des SLMs que j’ai détaillé dans ce chapitre a été utilisée pour optimiser le fonctionnement des SLMs qui sont présents des phototraceurs montrés aux chapitres 3 et 4.



(a) Vue 3D codé couleur du réseau sinusoïdal



(b) Graphique qui montre les profondeurs de gravure mesurées à l'aide du profilomètre (Annexe B) au niveau de la ligne verte sur la figure 2.14a.

FIGURE 2.14 – Vues du réseau sinusoïdal obtenu sur la photorésine insolé.

Nous avons aussi introduit la notion des DMD. Dans le chapitre 4 nous présentons un deuxième phototraceur que nous avons développé qui fonctionne à la longueur d'onde $\lambda = 365$ nm. Nous avons choisi cette longueur d'onde afin d'obtenir des résolutions plus petites que celle du phototraceur LCD, comme cette longueur d'onde endommage le cristal liquide nous avons choisi un SLM à base des micro-miroir.

Bibliographie

- [1] J. L. de Bougrenet de la Tocnaye and L. Dupont, "Complex amplitude modulation by use of liquid-crystal spatial light modulators," *Appl. Opt.*, vol. 36, pp. 1730–1741, Mar 1997.
- [2] J. Otón, P. Ambs, M. S. Millán, and E. Pérez-Cabré, "Multipoint phase calibration for improved compensation of inherent wavefront distortion in parallel aligned liquid crystal on silicon displays," *Appl. Opt.*, vol. 46, pp. 5667–5679, Aug 2007.
- [3] U. Efron, *Spatial Light Modulator Technology : Materials, Devices and Applications*. CRC Press, 1 ed., Sept. 1994.
- [4] F. T. S. Yu, X. Lu, and M. Cao, "Application of a magneto-optic spatial light modulator to white-light optical processing," *Appl. Opt.*, vol. 23, pp. 4100–4104, Nov 1984.
- [5] U. Arad, E. Redmard, M. Shamay, A. Averboukh, S. Levit, and U. Efron, "Development of a large high-performance 2-d array of GaAs-AlGaAs multiple quantum-well modulators," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 15, pp. 1531–1533, Nov. 2003.
- [6] S. Junique, Q. Wang, S. Almqvist, J. Guo, H. Martijn, B. Noharet, and J. Y. Andersson, "GaAs-based multiple-quantum-well spatial light modulators fabricated by a wafer-scale process," *Appl. Opt.*, vol. 44, pp. 1635–1641, Mar 2005.
- [7] K. Sayyah, M. S. Welkowsky, P. G. Reif, and N. W. Goodwin, "High performance single crystal silicon liquid crystal light valve with good image uniformity," *Appl. Opt.*, vol. 28, pp. 4748–4756, Nov 1989.
- [8] M. Killinger, J. L. de Bougrenet de la Tocnaye, P. Cambon, R. C. Chittick, and W. A. Crossland, "Bistability and nonlinearity in optically addressed ferroelectric liquid-crystal spatial light modulators : applications to neurocomputing," *Appl. Opt.*, vol. 31, pp. 3930–3936, Jul 1992.
- [9] B. Fracasso, J. L. de Bougrenet de la Tocnaye, and P. Ambs, "Recording reconfigurable binary computer-generated holograms on bistable optically addressed ferroelectric liquid-crystal spatial light modulators," *Opt. Lett.*, vol. 15, pp. 1473–1475, Dec 1990.
- [10] S. Mias, I. G. Manolis, N. Collings, T. D. Wilkinson, and W. A. Crossland, "Phase-modulating bistable optically addressed spatial light modulators using wide-switching-angle ferroelectric liquid crystal layer," *Optical Engineering*, vol. 44, no. 1, p. 014003, 2005.

-
- [11] P. G. de Gennes and J. Prost, *The Physics of Liquid Crystals*. Oxford University Press, USA, 2 ed., Aug. 1995.
- [12] S. C. F.R.S, *Liquid Crystals*. Cambridge University Press, 2 ed., Jan. 1993.
- [13] P. Oswald and P. Pieranski, *Les cristaux liquides : Concepts et propriétés physiques illustrés par des expériences, tome 1*. Editions scientifiques GB - Gordon and Breach, Sept. 2000.
- [14] W. P. J. Priestly, E. and P. Sheng, *Introduction to Liquid Crystals*. Springer, 1 ed., Jan. 1976.
- [15] E. Hällstig, "Nematic liquid crystal spatial light modulators for laser beam steering." <http://uu.diva-portal.org/smash/record.jsf?isbn=91-554-6110-7>, 2004.
- [16] B. Vinouze, *Cristaux liquides nématiques en hélice pour matrice active*. PhD thesis, INSA Rennes, France, 1995.
- [17] S. E. Lyshevski, *MEMS and NEMS : Systems, Devices, and Structures*. CRC Press, 1 ed., Jan. 2002.
- [18] P. Viktorovitch, *Microsystèmes opto-électromécaniques : MOEMS*. Traité EGEM, Série Microsystèmes [Texte imprimé]. - Paris : Hermès publications, 200X-, 2003.
- [19] T.-W. Yeow, K. Law, and A. Goldenberg, "Mems optical switches," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 39, pp. 158 –163, nov 2001.
- [20] "Deformable mirrors." <http://www.bostonmicromachines.com/>.
- [21] M. François Roddier, University of Hawaii, *Adaptive Optics in Astronomy*. Cambridge University Press, 1999.
- [22] S. Lantinga, "Simple directmedia layer," Octobre 2009. <http://www.libsdl.org/index.php>.

Chapitre 3

Amélioration du phototraceur LCD

Au sein du département optique de Télécom Bretagne, dans le cadre du projet européen DRAWMAP^{1,2}, un phototraceur à écriture massivement parallèle a été développé sur la base d'un photorépéteur standard où un micro-écran à cristaux liquides (LCD) remplace le réticule traditionnel [1]. Ce projet a fait l'objet de la thèse de doctorat de Marwa El Bouz [2] et du travail post-doctoral de Carole Moussu.

Le phototraceur parallèle est essentiellement constitué d'une source lumineuse, d'un modulateur spatial de lumière (SLM), d'un objectif de projection et de platines de translation XY, comme il est illustré dans la figure 3.1. Ce phototraceur a été construit à partir d'un photorépéteur GCA 4800DSW (figure 3.2) en remplaçant le masque lithographique fixe par un micro-écran LCD (figure 3.4). Une lampe à vapeur de mercure, filtrée à la ligne G de longueur d'onde $\lambda = 436$ nm, éclaire la totalité de l'écran LCD. L'image, affichée sur le modulateur, est projetée par un objectif de réduction de facteur 5 : 1 sur une fine couche de photorésine déposée sur un substrat. Ce dernier est placé sur une platine de translation afin de couvrir une surface d'insolation maximum d'environ 15×15 cm².

Les structures insolées à l'aide du phototraceur sont généralement de dimensions supérieures à celle de l'image du micro-écran sur le substrat. C'est la raison pour laquelle l'insolation de ces composants se fait en plusieurs étapes en divisant l'image initiale en plusieurs «imassettes» de la taille de l'image du micro-écran.

Le premier micro-écran utilisé dans le phototraceur était un LCD *Philips* comportant 640×480 pixels au pas de $88,5\mu\text{m}$. Cet écran a été remplacé

1. DRAWMAP : Direct Parallel-Write Multi-Application photoplotter
2. Le projet DRAWMAP, de février 1999 à février 2001, référence BRST-CT98-5524 comportant 7 partenaires (France, Grande Bretagne, Allemagne, Autriche, Suède).

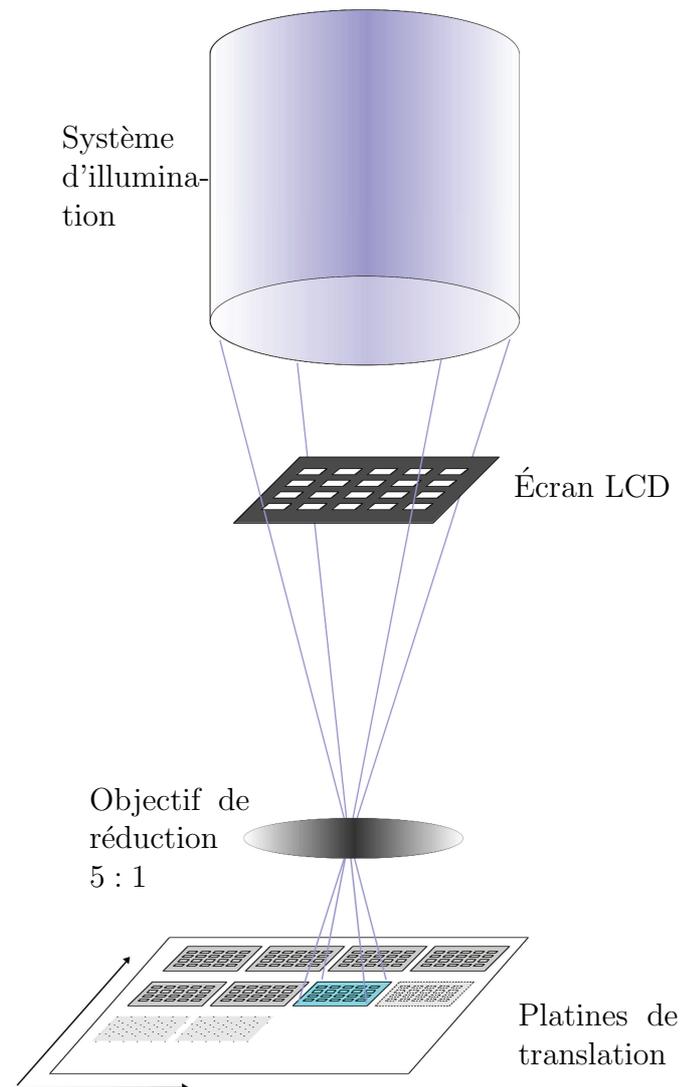


FIGURE 3.1 – Schéma illustratif du phototraceur LCD. La lampe illumine le micro-écran LCD. L'objectif de réduction projette l'image à tracer sur le matériel photosensible avec un facteur de réduction 5 : 1. La substance photosensible est déposée sur un substrat en verre qui est à son tour mis sur des platines de translation.

quelques années plus tard par un plus récent de chez *TL Electronics* de définition 800×600 pixels rectangulaires sur une matrice carrée de pas de $33 \mu\text{m}$ avec une connexion analogique vers l'ordinateur. C'est cet écran qui était dans le phototraceur à mon arrivée.

Ce micro-écran était le meilleur à l'époque de son installation. Grâce aux progrès des vidéoprojecteurs depuis, de meilleurs écrans ont été fabriqués avec un plus grand nombre de pixels, des tailles de pixels plus petites, un meilleur

contraste et un adressage numérique. Afin d'augmenter la vitesse de fabrication de nos composants, il faut augmenter le nombre de pixels dans les «imassettes», ce qui signifie remplacer le micro-écran LCD par un autre ayant un plus grand nombre de pixels. Un autre avantage est obtenu en augmentant le nombre de pixels dans la même zone d'insolation. Les pixels du nouveau LCD étant plus petits, ceci nous donne accès à des résolutions plus petites.

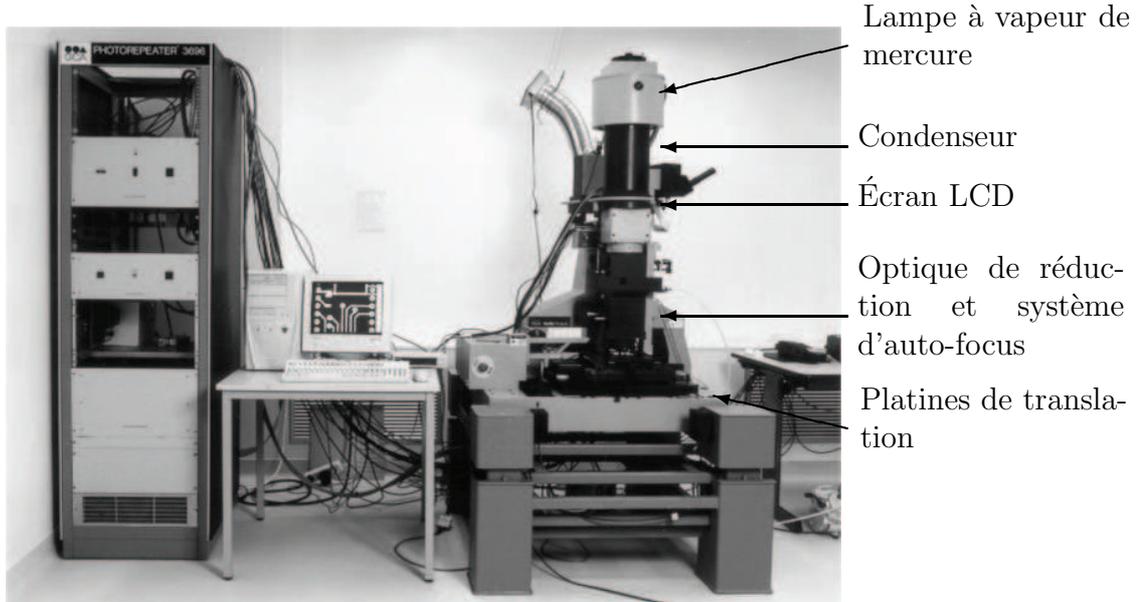


FIGURE 3.2 – Phototraceur LCD : basé sur un micro-écran à cristaux liquides

Dans ce chapitre, je décris le principe de fonctionnement du phototraceur massivement parallèle (sections 3.1 et 3.2) avant de présenter les améliorations que j'ai apporté pendant les travaux de ma thèse. Dans la section 3.4, je montre les limitations des composants fabriqués avec l'écran LCD de chez TL Electronic GmbH² présent dans le phototraceur à mon arrivée. J'ai par la suite effectué les modifications au système afin de remplacer cet écran par un autre écran Epson plus moderne, plus performant, et je montre dans la section 3.5 les résultats obtenus avec le nouvel LCD en les comparant avec les insulations effectués à l'aide de l'écran LCD de chez TL Electronic.

3.1 Composition du phototraceur LCD

3.1.1 Système d'illumination

Les matériaux photosensibles que nous utilisons pour fabriquer nos composants ont une bande de sensibilité spectrale spécifique donc nous avons besoin d'un système d'illumination bien spécifique en longueur d'onde. Dans notre phototraceur, le système d'illumination qui lui est associé possède une lampe

à vapeur de mercure comme source lumineuse. Cette lampe de puissance électrique 350 W et le système de mise en forme associé produisent $7,5 \text{ mW/cm}^2$ au niveau du réticule d'une surface de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ avec un degré d'uniformité de $\pm 1\%$. Cette lampe émet une lumière de large bande et parmi ses pics on note la raie g à 436nm [3]. Le système d'illumination filtre toutes les autres longueurs d'ondes, en particulier l'ultra-violet, car elles endommageraient les cellules de cristal liquide. La lampe à vapeur de mercure ne peut être directement modulée, donc un obturateur électro-mécanique est utilisé pour illuminer le SLM uniquement lorsqu'une image valide y est affichée.

3.1.2 Micro-écran à cristaux liquides (LCD)

Le micro-écran à cristaux liquides est une cellule de cristaux liquides composé d'une matrice de pixels commandés chacun séparément. Nous avons dans notre système un SLM de chez TL Electronic GmbH² de définition 800×600 pixels. Cet écran est transmissif car le montage de notre système optique nous impose ce mode.

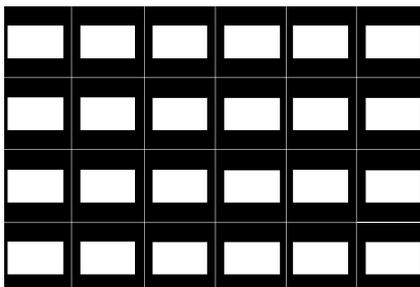


FIGURE 3.3 – Représentation schématique d'un écran LCD de 24 pixels.

Un pixel de l'écran LCD est constitué d'une surface centrale rectangulaire transparente de dimension $25 \times 15 \mu\text{m}^2$, cette surface est en ITO³, entourée d'une zone opaque qui constitue le circuit de commande (figure 3.3). Ce SLM est monté sur un support adapté placé sur le haut de la colonne de réduction (figure 3.4) de telle sorte que le plan des cristaux liquides et le plan de la photorésine soient parallèles et conjugués. L'écran est monochrome. Les images affichées sur celui-ci sont codées en 8 bits, ce qui correspond théoriquement à 256 niveaux de gris. L'écran est commandé par l'ordinateur de pilotage du système à travers une carte graphique VGA dont le rôle est d'afficher les images sur le SLM. La vitesse de rafraîchissement de l'écran limite dans certain cas la vitesse de phototraçage⁴. Cependant, La perte de temps liée au rafraîchissement de l'écran est compensée par le grand parallélisme du système. En effet,

3. ITO : Indium Titanium Oxyde, C'est un électrode transparent

4. A 25°C , le temps de ré-orientation des cristaux liquides est de 10 ms pour une transition ON et de 30 ms pour une transition OFF.

le demi-million de faisceaux utilisés permet un gain important de rapidité de phototraçage en comparaison avec des techniques utilisant un seul faisceau d'écriture.

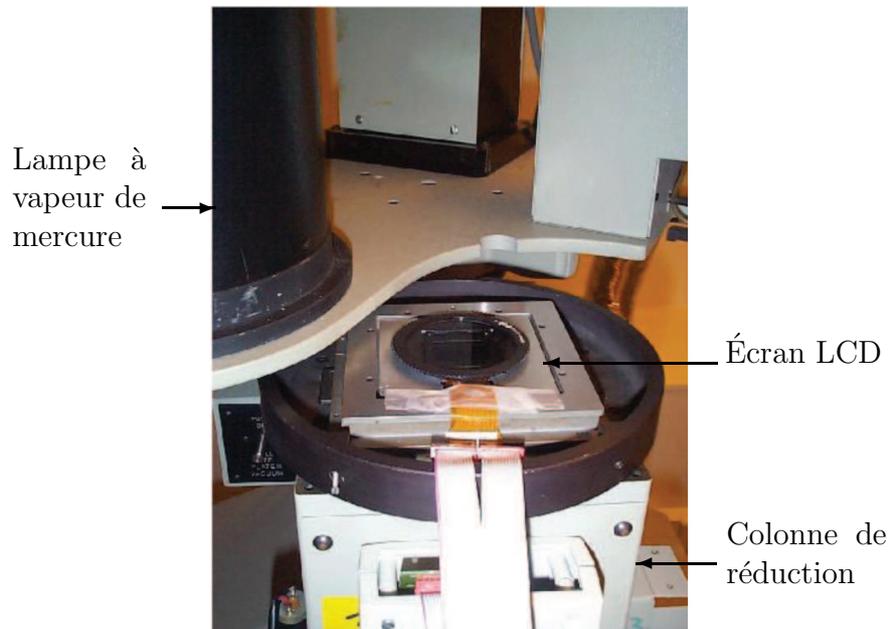


FIGURE 3.4 – Micro-écran LCD monté sur la colonne de réduction.

3.1.3 Colonne de réduction

L'objectif de réduction, optimisé par le fabricant ZEISS^{5,6}, constitue le noyau du système de projection. La qualité de ce dernier influence directement les éléments caractéristiques de la structure inscrits dans la photorésine. Le facteur de réduction est de 5 : 1 de profondeur de champ de $2 \mu\text{m}$ environ avec une ouverture numérique de 0.30 donnant une résolution d'un micromètre sur un champ potentiel d'écriture de $16 \times 16 \text{mm}^2$ avec une distorsion inférieure à 80 nm. L'image de la zone centrale transparente des pixels du SLM ainsi que la zone opaque située entre les pixels est résolue sur la photorésine (figure 3.5). La zone centrale transparente du pixel au niveau de la photorésine est approximativement de la taille de $5 \times 3 \mu\text{m}^2$ sur un pas de $6,6 \mu\text{m}^2$.

5. ZEISS est une entreprise fondée en Allemagne par Carl Zeiss, Ernst Abbe, et Otto Schott. ZEISS produit des dispositifs optiques et est notamment connue du public pour ses objectifs photographiques hauts de gamme.

6. Référence de cet objectif dans la base de données de ZEISS : 10-78-37.

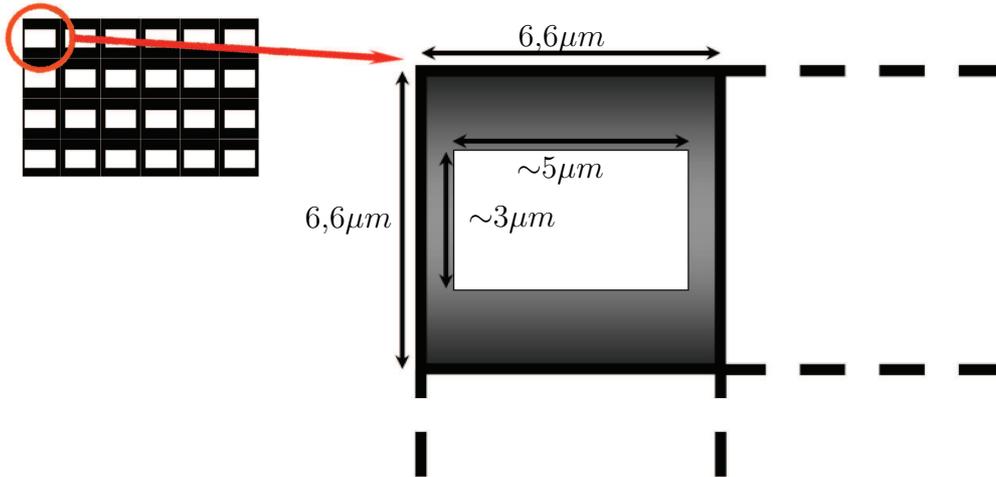


FIGURE 3.5 – Dimension d’un pixel au niveau de la photorésine, après réduction d’un facteur 5 : 1.

3.1.4 L’autofocus

Nous faisons nos insolations sur de la photorésine déposée sur un substrat de verre. Ce substrat a une variation de planéarité allant jusqu’à quelques μm . De plus l’épaisseur du dépôt de la photorésine n’est pas constant et peut varier au travers du substrat. En additionnant les deux différences d’épaisseur on remarque que la présence d’un système de focalisation variable est incontournable. La mise au point est assurée par un système qui maintient la focalisation de l’image du SLM sur la photorésine à tout instant. Ce système d’autofocalisation consiste à changer la position de la colonne de projection en fonction de la variation de l’épaisseur de la photorésine, sa gamme étant limitée, les substrats doivent être d’épaisseurs semblables : typiquement entre 1,5 mm et 2 mm.

3.1.5 Platines de translation XY

Les composants fabriqués à l’aide de ce phototraceur ont en général une dimension supérieure à celle de l’image du micro-écran LCD. En conséquence, l’image doit être décomposée en plusieurs “imassettes” ayant une dimension égale à celle de l’écran LCD. Ces imassettes sont affichées sur le SLM en effectuant une translation à l’aide des platines de translation entre deux imassettes. Le but de ces translations est de raccorder les imassettes pour reconstruire l’image d’origine. Les platines de translation couvrent un plan parallèle à l’écran LCD et de surface de $15 \times 15 \text{ cm}^2$. La position des platines est contrôlée par un système interférométrique à une résolution inférieure à 40 nm.

3.2 Fonctionnement du phototraceur

Le phototraceur est constitué de plusieurs composants qui doivent être synchronisés ensemble. Pour cette raison, nous avons écrit un programme en langage C sous Linux pour piloter le phototraceur. Nous avons écrit deux programmes, pour fabriquer nos composants. L'un sert à tracer des composants binaires et l'autre des composants en multiniveaux.

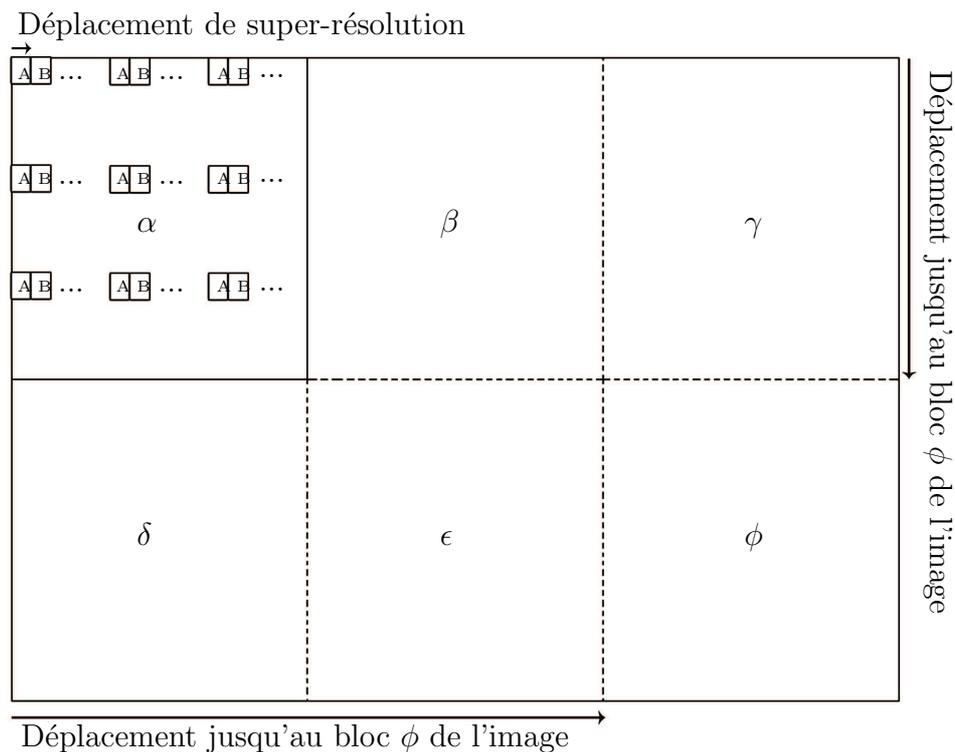


FIGURE 3.6 – Découpage de la structure globale en imageries 800×600 pixels.

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon,$ et ϕ : Blocs des imageries de 800×600 pixels

Pixels A : Première image de super-résolution affichée à l'écran pour tracer l'image du bloc α

Pixels B : Seconde image de super-résolution affichée à l'écran pour tracer l'image du bloc α

Les deux programmes suivent le même algorithme de découpage et de traçage. La seule différence entre les deux se trouve au niveau de l'affichage, dont je parlerai dans la section 3.2.2. Ainsi, quand on lance une insolation, les platines s'initialisent et elles se déplacent vers la position désirée, ensuite l'image est affichée sur le SLM et, finalement, l'obturateur s'ouvre pour effectuer l'insolation. Les composants à fabriquer, qui ont une taille plus grande que celle de l'écran LCD, sont découpés en imageries de 800×600 pixels lors du phototra-

çage. Chacune des imagettes est insolée juste à côté de l'imagette précédente, reconstituant ainsi la structure souhaitée dans la photorésine (figure 3.1). En procédant de cette manière, nous pouvons graver des surfaces jusqu'à $15 \times 15 \text{ cm}^2$ sachant que la taille du micro-écran est d'environ $0,52 \times 0,38 \text{ cm}^2$ au niveau de la photorésine.

3.2.1 Super résolution (SR)

L'écriture directe d'une structure à deux dimensions consiste à afficher une image sur le micro-écran. Le SLM sera illuminé pendant une durée suffisante pour exposer complètement la photorésine. Ces zones de photorésine exposées, correspondant aux zones transparentes du micro-écran, disparaissent lors du développement chimique de la photorésine. Cependant le micro-écran est pixelisé, et il existe entre chaque pixel des zones opaques. Si on affiche une image blanche sur le micro-écran et on l'illumine, on exposera uniquement des zones rectangulaires sur la photorésine. Des zones gravées de $3 \times 5 \mu\text{m}$ correspondent aux zones transparentes du micro-écran et des zones interpixels non gravées de l'ordre de $1 \text{ à } 3 \mu\text{m}$ (figure 3.3) correspondent aux circuits de commande du micro-écran (voir figure 3.7a). Ce phénomène de zones non-gravées doit être éliminé afin de fabriquer des EODs continus.

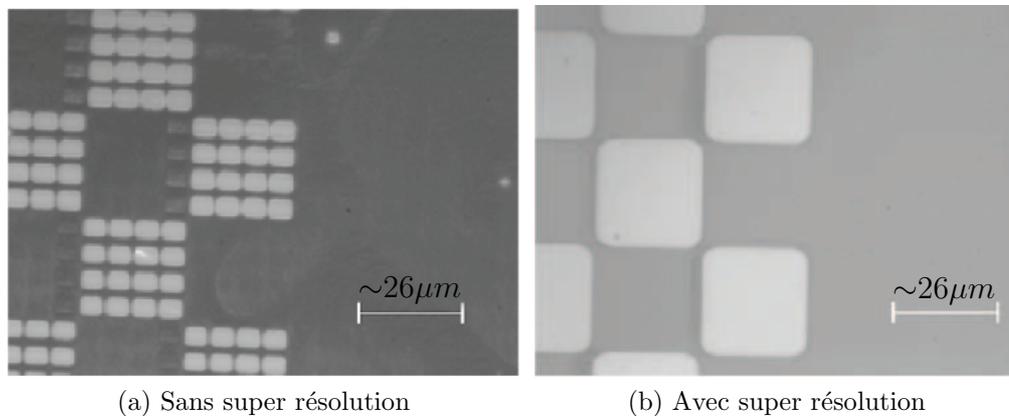


FIGURE 3.7 – Insulations d'un damier de pas de 4 pixels sans et avec super résolution.

Nous avons développé une technique que nous avons nommé *Super résolution* qui permet de combler l'espace non exposé entre les pixels. Les platines, sur lesquelles on a posé le substrat, effectuent un déplacement entre chaque insolation d'une distance inférieure à la distance inter-pixel. Cette technique se répète plusieurs fois pour couvrir tout l'espace interpixel dans les deux directions X et Y. Un facteur de super-résolution de 2×2 suffit pour éliminer les espaces interpixels, mais nous utilisons typiquement un facteur de super

résolution égale à 6×6 , ce qui correspond à 36 insolutions au total. Ceci permet d'éliminer l'espacement, d'uniformiser la dose d'illumination et aussi de réduire l'effet «d'escalier» sur les bords des motifs gravés. Une comparaison entre une image sans super résolution (figure 3.7a) et une image avec super résolution (figure 3.7b) est illustrée dans la figure 3.7.

3.2.2 Multiniveaux

Pour réaliser des structures «3D» dans la photorésine, autrement dit du multiniveaux, on a recours à une autre technique d'insolation. Cette technique permet de graver différentes profondeurs dans la photorésine. Avec un choix judicieux de photorésine et les conditions de développement décrites dans la section 3.3, il est possible de rendre linéaire la réponse de la photorésine après un seuil d'amorçage, ce qui implique que plus on expose la photorésine plus elle est profondément gravé. Pour pouvoir créer des structures multiniveaux, nous avons établi un tableau de calibration afin de trouver le temps nécessaire d'exposition qui correspond à chaque niveau de profondeur.

Dans le but de fabriquer des structures a n niveaux, nous pouvons soit afficher des images en niveaux de gris directement sur le micro-écran, soit afficher des images binaires pour des temps d'exposition différents. Avec l'écran TL , les niveaux de gris n'étaient pas contrôlés photométriquement, ce qui entraîne des insolutions non-uniformes et non-répétables. Donc, nous avons choisi d'afficher une succession de n images binaires pendant des temps différents afin de contrôler et varier la qualité totale de lumière reçue en chaque point du substrat. Mais cette technique efficace nécessite la ré-écriture de chaque image binaire sur la carte graphique ce qui rend le temps global de l'insolation long. La librairie `SVGAlib` sous langage C utilisé pour afficher les images possède une fonction qui donne accès aux palettes de la carte graphique. Cette librairie charge l'image de n niveaux de gris⁷ dans la mémoire de la carte graphique, ensuite, à l'aide des palettes, on affiche les pixels ayant une valeur inférieure au niveau n_i en pixels opaques et les pixels ayant une valeur supérieure au niveau n_i sont affichés en pixels transparents. En balayant n_i du niveau 0 au niveau n sans fermer l'obturateur, on procède à une insolation multiniveaux en illuminant la photorésine par des différents temps de pose. Le changement des palettes est plus rapide que de charger une image sur l'écran pour chaque niveau de gris, c'est la raison pour laquelle nous avons choisi l'approche par palettes.

7. Chaque niveau de gris correspond à une profondeur dans la photorésine, le niveau 0 correspond à une photorésine non gravée et le niveau n correspond à une photorésine gravée jusqu'au substrat.

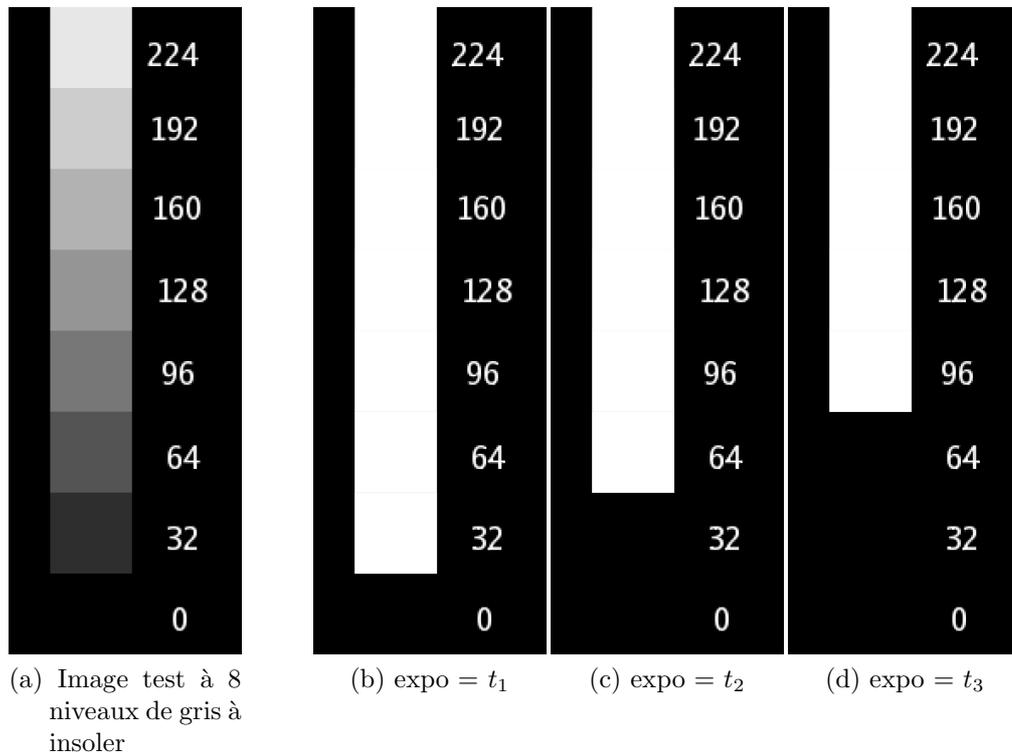


FIGURE 3.8 – Procédure d’insolation de structures multiniveaux à l’aide de la bibliothèque graphique SVGAlib

Figure 3.8a : Image test à 8 niveaux de gris. Cette image est chargée sur la carte graphique afin d’être affichée par la librairie SVGAlib sur le micro-écran à l’aide des palettes.

Figure 3.8b : 1^{re} image affichée sur le SLM. Tous les niveaux gris plus petits que 32 sont en noir et le reste en blanc pour un temps t_1

Figure 3.8c : 2^{me} image affichée sur le SLM. Tous les niveaux gris plus petits que 64 deviennent en noir et les autres restent en blanc pour un temps t_2

Figure 3.8d : 3^{me} image affichée sur le SLM. Tous les niveaux gris plus petits que 96 deviennent en noir et les autres restent en blanc pour un temps t_3

3.3 Photorésine

Pour toutes nos expériences avec ce phototraceur, nous utilisons les photorésines positives *Shipley* de la série *S1800* pour travailler avec des couches de photorésine d’épaisseur allant de quelques centaines de nanomètres à quelques micromètres. Cette photorésine possède une plage de réponse photochimique sur les longueurs d’ondes comprise entre 350 nm et 450 nm, avec une sensibilité maximale située aux alentours de 436 nm. Nous avons adapté la méthode

de développement de cette photorésine. Notre technique consiste à développer la photorésine dans une solution de *MICROPOSIT*[®] *Developer 303* diluée en rapport 1 : 12 dans de l'eau désionisée pendant 2 min. Nous avons choisi cette solution de développement pour rendre linéaire la réponse entre le temps d'exposition et le niveau de gris. Une fois les paramètres de dilution et de développement fixés, seule la durée d'exposition change pendant les expériences afin qu'elle qu'elle soit adaptée à chaque profondeur.

Pour la réalisation de composants binaires, nous avons déposé la photorésine *SHIPLEY S1805* sur un substrat de verre à l'aide d'une tournette («spin coater») à une vitesse $v = 2500$ tr/min et à une accélération de $a = 1500$ tr/min/s pendant un temps $t = 40$ s. Pour la réalisation de composants multiniveaux, nous avons déposé la photorésine *SHIPLEY S1813* sur un substrat de verre à l'aide d'une tournette à une vitesse $v = 4000$ tr/min et à une accélération de $a = 1500$ tr/min/s pendant un temps $t = 40$ s. Puis nous avons passé le substrat sur une plaque chauffante pour une pré-cuisson de 3 min à 110 °C. Après l'insolation de ces substrats, nous avons développé le composant dans le développeur *MICROPOSIT developer 303A* pendant 2 min, nous les avons ensuite passés sous une irradiation UV pendant 2 min et finalement ils ont été post-cuit pendant 2 heures à 105 °C.

3.4 Limitations du LCD TL Electronic

À mon arrivée, le phototraceur [1] existant à Télécom Bretagne était particulièrement performant pour la fabrication des EOD prototypes et était utilisé avec succès par le département d'optique et l'entreprise *Holotetrix* depuis quelques années. Cependant, il devenait de plus en plus clair que l'écran LCD TL était l'élément limitant des performances du système, en particulier aux niveaux de la forme des pixels, de la rapidité, de la résolution, du nombre de niveaux de gris. Afin de dépasser ces limitations, nous avons donc cherché à remplacer le micro-écran par un autre qui soit plus moderne et plus performant. Une partie des travaux de ma thèse a été de réduire voire d'éliminer les limitations liées à l'écran LCD de ce phototraceur. Je présente maintenant rapidement, dans cette section, les limitations de ce phototraceur. En particulier j'adresse les problèmes de la forme des pixels rectangulaires, du contraste limité du SLM, et de la limitation de la rapidité due à la carte graphique VGA.

3.4.1 Forme des pixels

Pour nos applications, l'un des défauts majeurs du micro-écran *TL Electronics* est la forme de ses pixels. Ce micro-écran de 800×600 pixels possède des pixels transparents rectangulaires sur un maillage carré. Un pixel transparent sur le micro-écran de dimension $25 \times 15 \mu m^2$ sera projeté sur la photorésine en

effectuant une réduction de 5 : 1, pour avoir un pixel de dimension $5 \times 3 \mu m^2$. Le pas des pixels de $33 \mu m$ projeté sur la photorésine est d'environ $6,6 \mu m$. Après développement de la résine, on remarque qu'entre chaque pixel gravé il y a des zones de $1 \mu m$ (horizontales) et $3 \mu m$ (verticales) non gravées (voir figure 3.9).

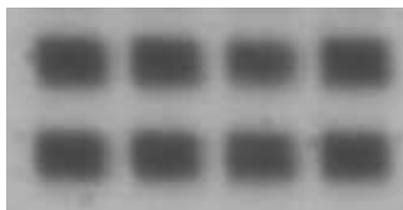


FIGURE 3.9 – Images des pixels individuels gravés sur la photorésine. On remarque la forme rectangulaire de chaque pixel, l'inter-pixel de $\sim 1 \mu m$ et de $\sim 3 \mu m$ selon la direction X ou Y .

On peut contourner l'espacement inter-pixels non gravé par la méthode de super résolution (section 3.2.1) mais le recouvrement n'est pas le même dans les deux directions X et Y ce qui entraîne un problème aux niveaux de l'uniformité de gravure dans les deux directions X et Y , et de taille de motif minimal différent : $3 \mu m$ dans la direction X et $5 \mu m$ dans la direction Y . On peut également compenser cette limitation d'élargissement avec une technique de précompensation de données [4] mais jamais parfaitement, de plus, cela rend le processus plus complexe.

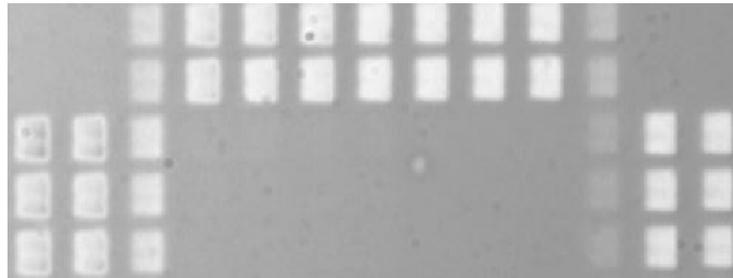
3.4.2 Contraste

Le micro-écran est connecté à une carte graphique VGA intégrée dans l'ordinateur. Les images qui doivent être affichées sur le micro-écran sont enregistrées dans la mémoire de l'ordinateur numériquement. La carte graphique transforme les images numériques en signal analogique afin de les envoyer vers le micro-écran, qui à son tour, échantillonne le signal analogique pour obtenir une valeur quantifiée du niveau de gris pour chaque pixel : les pixels blancs seront transparents pour une valeur de niveau de gris 255 et les pixels noirs seront opaques pour une valeur de niveau de gris 0. Cette conversion numérique-analogique-numérique (N-A-N) entraîne des erreurs et des pertes de données non nécessaires.

Ce problème se rajoute au contraste limité du micro-écran *TL Electronics* lors de l'affichage d'un bloc de pixels blancs suivi d'un bloc de pixels noirs, ou vice-versa, provoquant ainsi une erreur de conversion au niveau des fronts montants ou descendants. Un pixel intermédiaire entre les deux blocs aura une valeur ni de 0 ni de 255, ce qui implique que ce pixel transmettra légèrement la



(a) Carte des profondeurs gravées



(b) Photo prise dans un microscope interférentiel

FIGURE 3.10 – Image du composant obtenu près de l'intersection d'un bloc de pixels blancs avec un bloc de pixels noirs.

Figure 3.10a : Cette image montre les profondeurs codées par niveaux de gris : plus la couleur est foncée plus le niveau est profond. On voit des zones qui devraient être non-gravées mais elles le sont partiellement, dû au faible contraste de l'écran et surtout sur les bords des fronts montants ou descendants. Les tâches noires sont des artefacts de mesure provoqués par le logiciel de calcul de profondeur à l'aide du microscope interférentiel (voir Annexe B)

Figure 3.10b : Observation du même composant obtenue à l'aide d'un microscope interférentiel. On note que le contraste se réduit sur les bords des blocs noirs et blancs indiquant les profondeurs incorrectes.

lumière, ce qui aboutit à des zones incorrectement gravées sur la photorésine. (voir figure 3.10)

3.4.3 Effet de proximité

En appliquant la technique de la surrésolution (section 3.2.1), on obtient une augmentation des surfaces insolées plus large que désirée. Ce phénomène se produit car nous avons une grille d'adressage plus petite que la taille du pixel : on essaie de dessiner des points de taille $1 \mu m$ avec un «pinceau» de taille $5 \times 3 \mu m$. Cet effet est montré dans la figure 3.11 sachant qu'on doit obtenir un coin pointu, bien rectangulaire. Comme le montre cette figure, les

parties insolées sont reliées entre elles, de plus le bord entre l'endroit gravé et l'endroit non gravé présente une pente remarquable non abrupte.

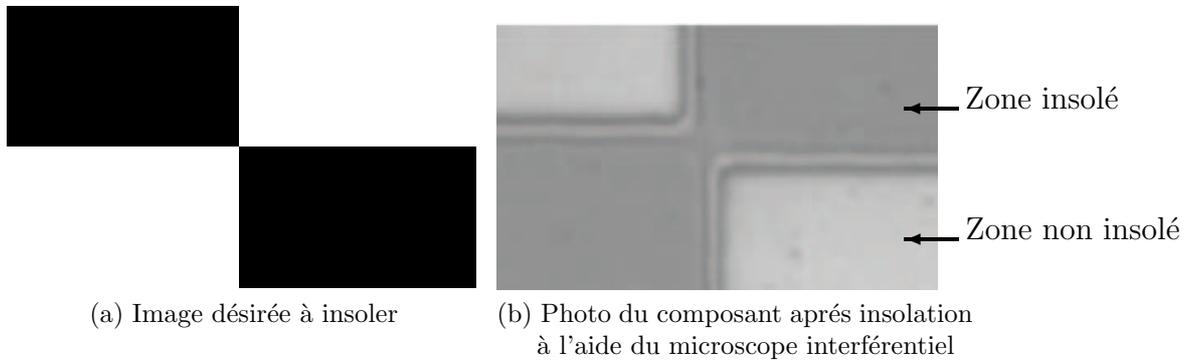


FIGURE 3.11 – Effet d'augmentation de la surface insolée, la figure 3.11b montre que les blocs insolés sont étendus.

3.4.4 Effet de bord du micro-écran

L'écran *TL Electronics* se constitue de deux zones. La première est la zone centrale qui contient les pixels actifs servant à afficher les imageries sur l'écran LCD. La deuxième est la zone des pixels inactifs qui sont au bord, ces pixels sont censés être toujours opaques, seulement ils ne le sont pas complètement donc la photorésine au bord des imageries sera légèrement gravée. Cet effet augmente et devient remarquable en utilisant la technique de surrésolution 6×6 , surtout aux endroits des raccords des blocs d'imageries. Au centre de la figure 3.12b, nous voyons le raccord des 4 imageries, où chaque coin

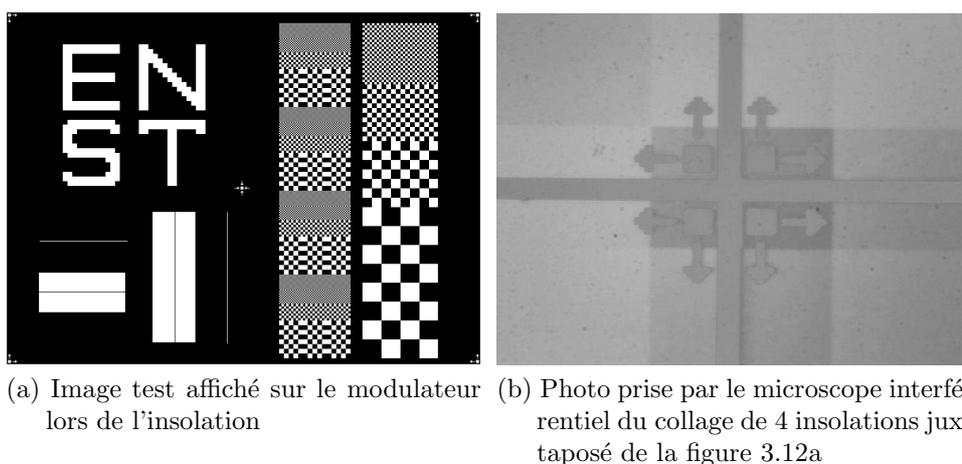


FIGURE 3.12 – Défauts de gravure dus aux effets de bordures avec l'écran LCD *TL Electronics*

est légèrement exposé par le bord inactif des autres imagettes. Cette légère exposition qui se répète 3 fois (3 imagettes juxtaposées) et 6×6 (surrésolution) dépasse le seuil du déclenchement de gravure de la photorésine, ce qui provoque une légère différence entre les profondeurs gravées.

3.4.5 Limite de résolution

Nous avons procédé à des expériences pour trouver la limite de résolution du phototraceur. Nous avons créé des images spécifiques contenant des lettres «L» de largeur de 1 pixel séparé de 5 pixels d'un côté de 3 pixels de l'autre côté (figure 3.13).

Nous avons insolé l'image test de la figure 3.13 en utilisant la surrésolution 6×6 . Cette image résulte dans l'insolation de lignes gravées de $3 \mu m$ dans une direction, et des lignes gravées de $5 \mu m$ dans l'autre direction correspondant aux dimensions des pixels qui sont $3 \times 5 \mu m$, avec un espace non-gravé de $1 \mu m$ qui correspond à la résolution limite de l'optique. La figure 3.14 montre l'image du composant fabriqué avec des lignes de $5 \mu m$ et un espacement de $1 \mu m$. On voit donc le problème de dissymétrie dans la résolution limite entre les zones gravées et non-gravées et entre les directions X et Y .

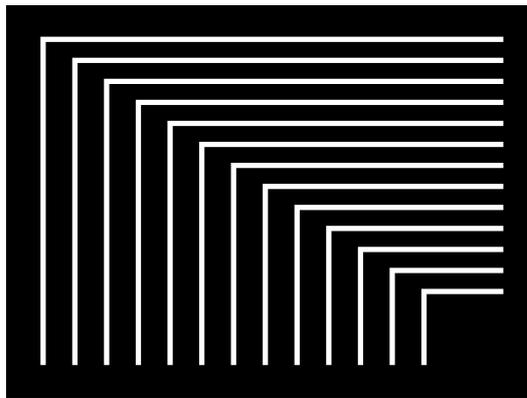
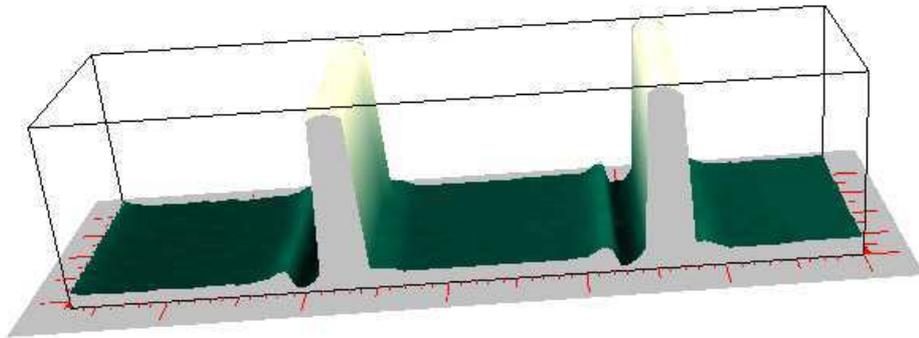
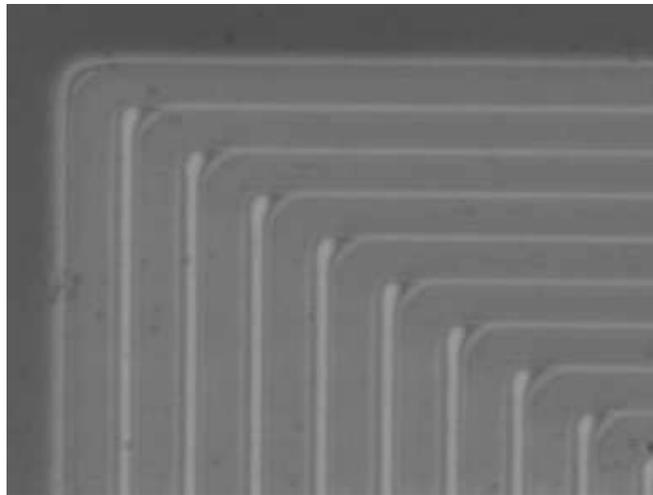


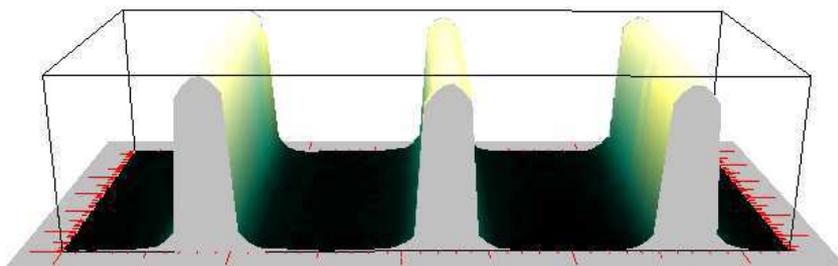
FIGURE 3.13 – Image de test de résolution : Des lignes en forme de «L» de largeur un seul pixel et espacé horizontalement de 5 pixels et verticalement de 3 pixels.



(a) Coupe 3D de la reconstruction de la carte des profondeurs par le microscope interférentiel pour des lignes de $5 \mu\text{m}$ séparées de $1 \mu\text{m}$.



(b) Photo prise par le microscope interférentiel pour des lignes de 3 et $5 \mu\text{m}$ séparées de $1 \mu\text{m}$.



(c) Coupe 3D de la reconstruction de la carte des profondeurs par le microscope interférentiel pour des lignes de $3 \mu\text{m}$ séparées de $1 \mu\text{m}$.

FIGURE 3.14 – Image d'un composant contenant des lignes gravées de $3 \mu\text{m}$ séparées de $1 \mu\text{m}$ d'un côté (Figure 3.14c) et des lignes gravées de $5 \mu\text{m}$ séparées de $1 \mu\text{m}$ de l'autre côté (Figure 3.14a).

3.5 Remplacement du micro-écran

D'après la section 3.4, il est clair que l'écran *TL Electronics* était un élément limitant la performance de notre phototraceur. Nous avons donc évalué les écrans disponibles sur le marché en fonction des critères principaux suivants : un plus grand nombre de pixels afin d'augmenter la vitesse du phototraçage, des pixels plus petits et carrés pour augmenter la résolution et simplifier la préparation des fichiers, un meilleur contraste, et une connexion numérique. D'autres critères pris en compte concernaient le coût, la disponibilité et la transmittance à 436 nm.

Nous avons ainsi choisi un micro-écran de chez Epson qui possède une connexion numérique utilisant le port DVI⁸ ; cette connexion transmet les données numériquement et évite donc les erreurs liées à la conversion numérique-analogique-numérique utilisé dans une connexion VGA. Ce micro-écran possède 1400×1050 pixels carrés de pas $20,55 \mu\text{m}$ dont la zone transparente est de $7,5 \times 7,5 \mu\text{m}$.

3.5.1 Montage mécanique

Ce nouveau micro-écran *Epson* est fourni avec ses deux polariseurs, ce qui n'était pas le cas du micro-écran *TL Electronics*. De plus, il n'a pas les mêmes dimensions. Par conséquent, afin de mettre en place ce micro-écran, nous avons fabriqué un nouveau support mécanique en aluminium. Ce nouveau système

8. DVI Digital Video Interface

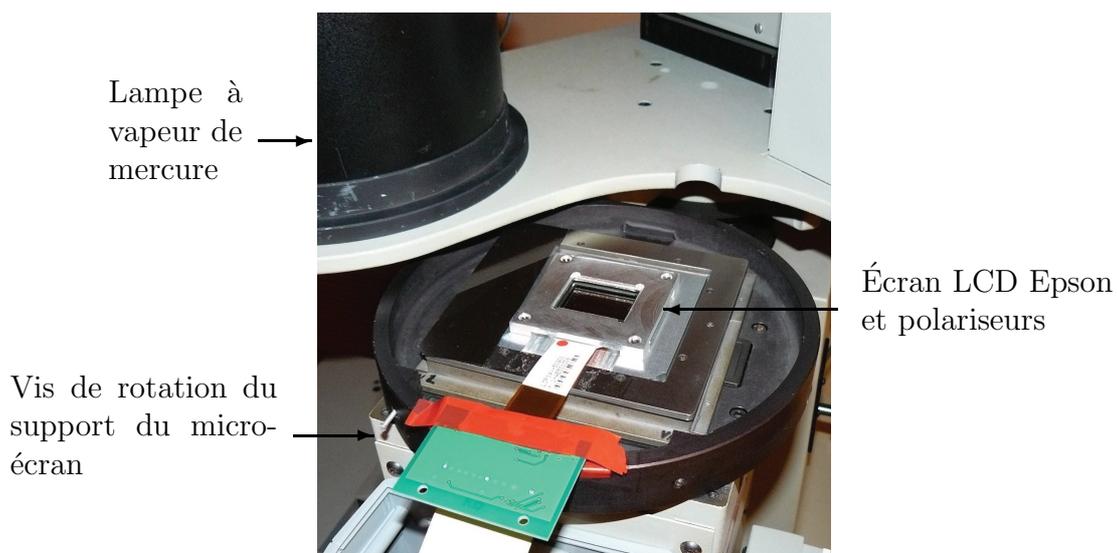


FIGURE 3.15 – Le nouveau micro-écran LCD Epson monté sur la colonne de réduction avec la nouvelle mécanique.

mécanique porte les deux polariseurs et le micro-écran en même temps, avec le polariseur au dessus du micro-écran et l'analyseur en dessous (figure 3.15).

Une fois le nouveau micro-écran en place, il faut régler trois paramètres très importants afin qu'il soit opérationnel. Tout d'abord, nous devons focaliser l'image du micro-écran sur le substrat, ensuite nous devons régler le parallélisme du plan du micro-écran avec le plan du substrat afin de focaliser toute la surface du micro-écran en même temps sur le substrat, et finalement, nous devons aligner l'angle du micro-écran avec les axes des platines de translation afin de bien juxtaposer les images du micro-écran (voir figures 3.16, 3.17 et 3.18).

Mise au point

Nous avons fabriqué une nouvelle mécanique pour mettre en place le nouvel écran *Epson* qui n'avait pas les mêmes dimensions que l'ancien. La modification la plus importante est la distance entre le micro-écran et l'objectif de projection ce qui entraîne une défocalisation de l'image du micro-écran sur la surface supérieure du substrat.

La colonne de réduction est équipée d'un système de translation micrométrique sur l'axe Z dont le but est de changer le plan de focalisation optique afin de refocaliser l'image du SLM sur le substrat. Il existe également un système d'autofocus qui assure la refocalisation de l'image sur quelques micromètre de variation dans la direction Z . La refocalisation se fait en modifiant la position de la colonne de réduction afin de faire coïncider le plan de l'autofocus et la surface supérieure du substrat.

La technique de refocalisation consiste à faire des insolations en balayant toutes les positions de la colonne de réduction. Nous avons commencé par la position la plus basse où l'image du micro-écran est en dessous de la surface supérieure du substrat, ce qui signifie que le motif insolé sur la photorésine est défocalisé comme le montre la figure 3.16a. Le balayage des positions est toujours effectué dans le même sens : de la position la plus basse vers la position la plus haute, car le mouvement de la mécanique de translation suit un cycle d'hystérésis. La position la plus haute forme l'image du micro-écran au dessus de la surface de la résine (figure 3.16c). Là aussi, nous obtenons un motif défocalisé. Il existe cependant une position de focalisation optimale où la netteté et la résolution sont maximales qui se situe entre la position la plus basse et la position la plus haute (figure 3.16b). C'est dans cette position que nous avons fait coïncider l'image du micro-écran et le plan d'autofocus. Une fois fait, le réglage n'a plus besoin d'être touché ; l'autofocus arrivant toujours à la mise au point optimale.

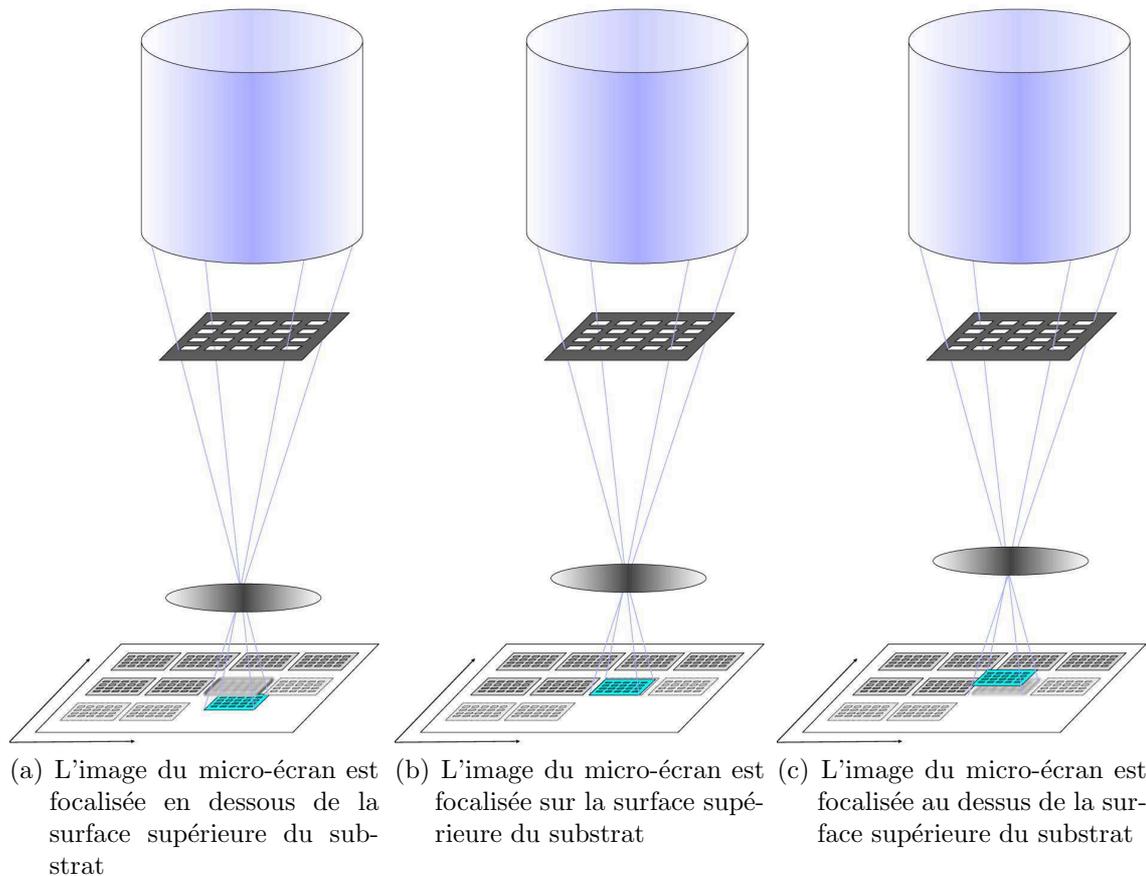


FIGURE 3.16 – Focalisation de l'image du micro-écran *Epson* sur la surface supérieure du substrat

Parallélisme hors plan

La focalisation du plan image sur la photorésine ne signifie pas que l'image du SLM est complètement focalisée sur toute sa surface. Il peut y avoir une ou plusieurs parties, en particulier les coins opposés de l'image, qui sont défocalisées comme le montre la figure 3.17a. Cette défocalisation est due à un angle qui se présente entre le plan du SLM et le plan de la photorésine. Afin de rendre parallèles les deux plans et ainsi obtenir une image focalisée au niveau de tous les coins, nous avons rajouté des cales micrométriques (5, 10, 20 et 50 μm) en dessous du support mécanique du SLM. Pour bien voir l'uniformité et la focalisation des quatre coins, nous avons juxtaposé quatre images et comparé la qualité de focalisation des coins de ces images. Pour procéder à cette étape, il est nécessaire en premier lieu de régler l'angle entre les axes du SLM et l'axe de translation des platines de translations.

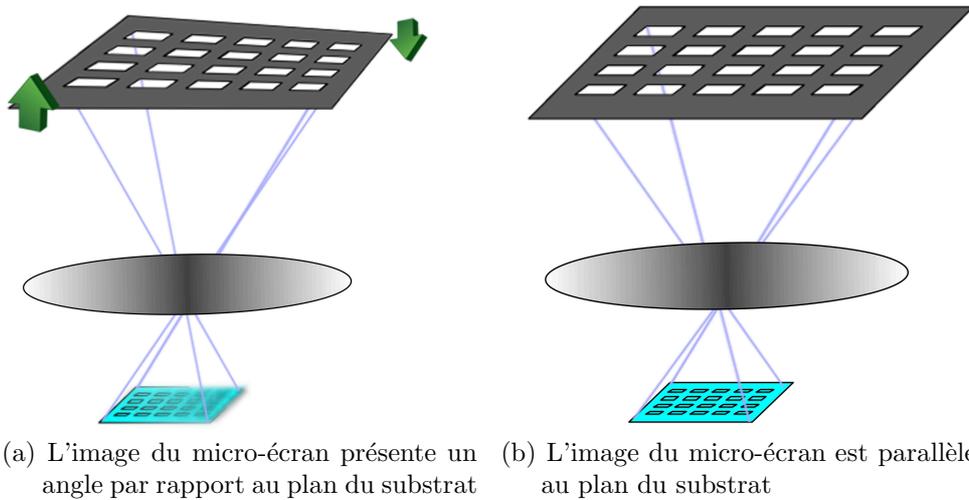


FIGURE 3.17 – Réglage du parallélisme entre le plan du substrat et celui du micro-écran *Epson*.

Parallélisme des axes du SLM et des axes des platines

Pour pouvoir tracer des grandes images supérieures à la taille du micro-écran nous avons besoin de découper l'image principale en petites imagettes de 1400×1050 pixels chacune et de les juxtaposer l'une à côté de l'autre. Notre logiciel de pilotage du phototraceur gère le découpage de l'image et la juxtaposition mais il ne peut pas gérer ni détecter s'il existe un angle entre les axes XY du SLM et les axes XY des platines de translation. Si cet angle existe, nous obtenons un décalage entre les imagettes juxtaposées ; ce décalage est montré dans la figure 3.18a. Ceci entraîne aussi un espacement non exposé entre les quatre coins des imagettes juxtaposées. Nous avons résolu ce problème en tournant le micro-écran dans son plan à l'aide d'une vis de rotation. Cette vis de rotation est montrée dans la figure 3.15, et permet, grâce aux procédures de calibration, d'obtenir la juxtaposition des imagettes (figure 3.18b).

Cette procédure consiste à insoler quatre imagettes juxtaposées pour chaque rotation de la vis. Nous avons comparé les résultats en mesurant l'espacement entre les coins au microscope. Nous avons obtenu un réglage précis à $1/4$ de pixel du SLM, ce qui est équivalent à environ $1 \mu\text{m}$ dans le plan du substrat. Cette précision de $1 \mu\text{m}$ pour $5740 \mu\text{m}$ ($1400 \text{ pixels} \times 4,1 \mu\text{m}$ de pas) est considérée suffisante pour les besoins de nos applications.

3.5.2 Montage électronique

La connexion du modulateur *TL Electronics* est VGA, celle du *Epson* est DVI, et l'ordinateur présent à l'époque était un ancien ordinateur qui

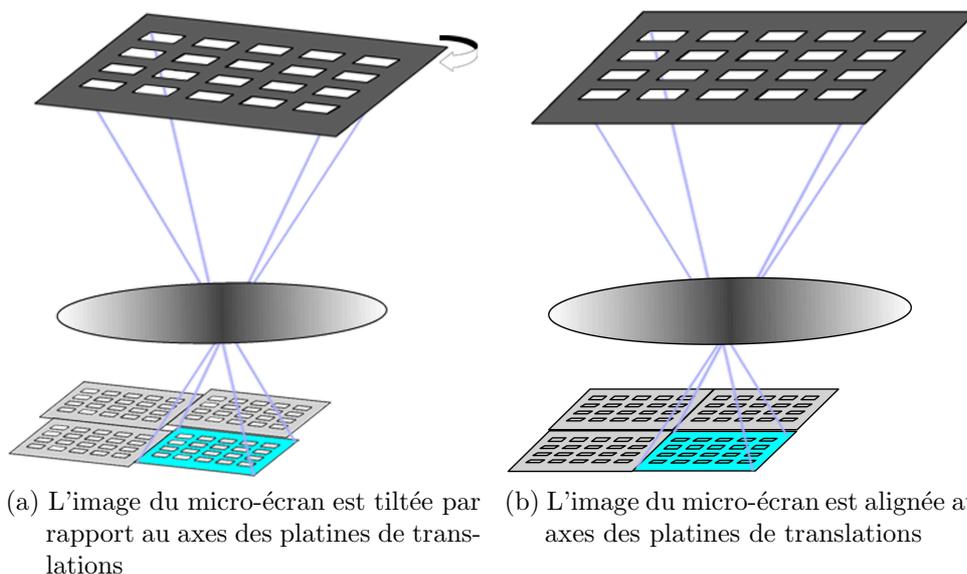


FIGURE 3.18 – Focalisation de l'image du micro-écran *Epson* sur la surface supérieure du substrat

avait une connexion VGA uniquement. Quant aux platines de translation et à l'obturateur, étant d'anciennes matériaux, ils se branchent à l'ordinateur via un port ISA^{9 10}. Nous avons donc dû choisir un nouvel ordinateur dans lequel on pouvait brancher une carte graphique moderne possédant une connexion DVI et une carte ISA. Cet ordinateur devait être fiable et pouvoir fonctionner pratiquement continuellement car il était destiné à devenir une machine de production pour le département optique de Télécom Bretagne et *Holotetrix*. Ces critères nous ont conduit à choisir un ordinateur industriel.

Nous étions confrontés à de sérieuses difficultés pour trouver un ordinateur contenant en même temps le port DVI (moderne) et le port ISA (ancien). L'entreprise *IPO Technologie* est une entreprise qui fabrique des ordinateurs semi-personnalisés. Elle nous a fourni un nouvel ordinateur (figure 3.19) ayant un port ISA et deux port DVI, ainsi qu'un nouveau processeur et 4 Giga-octets de mémoire vive permettant de faire le calcul et le découpage des images à tracer plus rapidement. Nous avons connecté l'écran de l'ordinateur à un port DVI, le micro-écran LCD au deuxième port DVI et les platines et l'obturateur au port ISA.

Nous avons rencontré ensuite de nouvelles difficultés, mais cette fois au niveau logiciel. Le logiciel de pilotage existant ne fonctionnait plus à cause de

9. ISA : Industry Standard Architecture

10. L'Industry Standard Architecture, généralement abrégé en ISA, est un standard de bus informatique interne utilisé pour connecter des cartes d'extension à la carte mère d'un ordinateur. C'est un bus de largeur 16 bits, avec une fréquence d'horloge de 8 MHz.

l'incompatibilité du nouveau matériel avec les pilotes logiciels («*drivers*»).

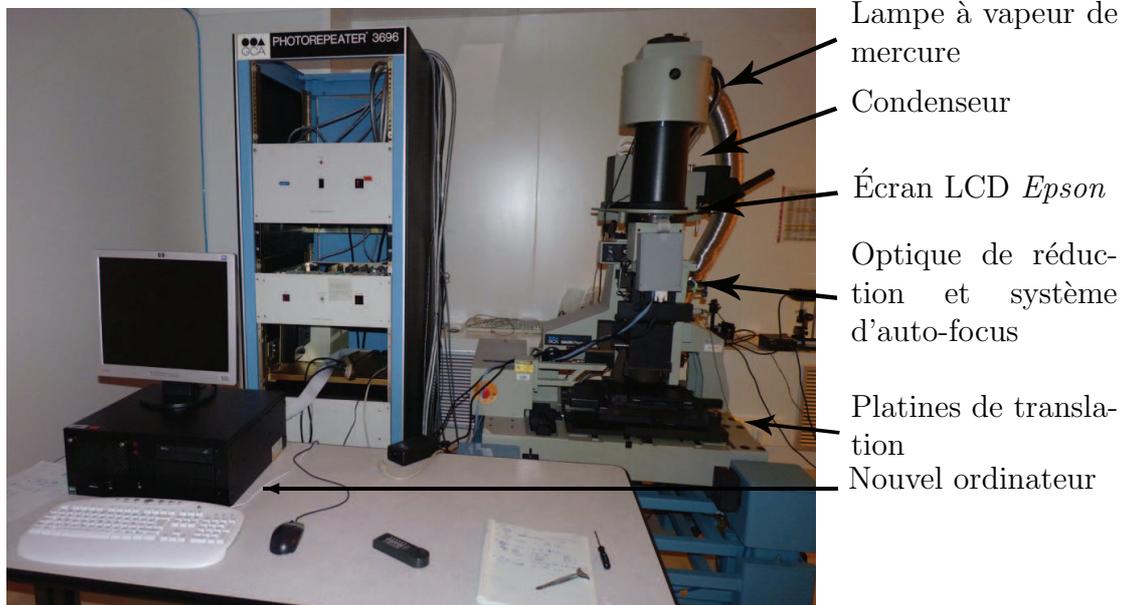


FIGURE 3.19 – Phototraceur LCD avec sa nouvelle configuration (micro-écran *Epson* et le nouvel ordinateur).

3.5.3 Modifications logicielles

Le rôle de la librairie *SVGAlib* [5] était d'afficher les motifs sur le micro-écran *TL Electronics*. Cette librairie qui est bas niveau n'est plus développée, donc elle n'est plus compatible avec la définition 1400×1050 pixels du nouveau SLM. Cette incompatibilité nous a imposé de remplacer l'ancienne librairie *SVGAlib* par une autre librairie plus récente, et compatible avec la nouvelle définition 1400×1050 . Nous avons choisi la librairie *SDL* [6] qui remplit largement nos besoins : toujours en cours de développement actif, compatible avec les nouvelles cartes graphiques possédant le port *DVI*, fonctionnant en plein écran, bas niveau, accès aux palettes de la carte graphique.

Cependant, le nouvel ordinateur doté d'une carte mère récente n'avait ni les mêmes configurations ni les mêmes ports que l'ancien ; en particulier la nouvelle carte mère qui n'utilise plus les mêmes adresses logiques pour les ports *ISA*. C'est la raison pour laquelle nous avons utilisé un logiciel de recherche d'adresse sous le système d'exploitation *FreeDOS* afin de retrouver l'adresse logique de la carte *ISA*. Nous avons pu ainsi modifier la configuration du *BIOS* afin de réserver l'adresse $0xCCC00$ pour le port *ISA* comme adresse de base. À l'aide du logiciel *ubridge* fourni par le constructeur des platines nous avons pu vérifier que les platines de translation fonctionnent, et par la suite

nous avons pu modifier le «pilote» que nous avons ré-écrit pour les rendre compatible avec le matériel existant.

3.6 Résultats obtenus avec le micro-écran Epson

Dans cette section, je présente les résultats des nouveaux composants fabriqués à l'aide du micro-écran *Epson* en les comparant à ceux fabriqués précédemment à l'aide du micro-écran *TL Electronics*

3.6.1 Forme des pixels et vitesse de traçage

Le nouveau micro-écran de définition 1400×1050 pixels possède des pixels carrés. Les pixels de ce modulateur ayant une zone de transparence de $7,5 \mu m$ et un pas de $20,55 \mu m$ sont projetés sur la photorésine avec une réduction de 5 : 1. Théoriquement l'image de projection de ces pixels sur la photorésine est carrée de dimension $1,5 \mu m$ et de pas $4,11 \mu m$. En pratique les pixels sont arrondis à cause de la résolution limite de l'optique de projection qui est d'environ $1 \mu m$ (figure 3.20). On note aussi que la largeur précise du pixel dépend du temps de pose et de la réponse de la photorésine, particulièrement avec la photorésine utilisée dans nos expériences qui est à réponse linéaire. Cet élargissement est conforme aux prédictions de l'effet de proximité et confirmé en pratique (cf. figure 3.20).

Nous avons obtenu, grâce à ce nouveau SLM, trois avancées majeures :

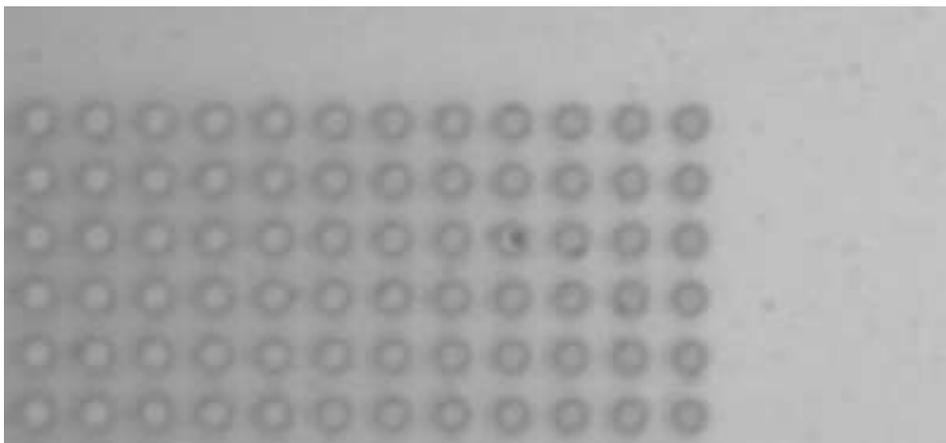


FIGURE 3.20 – Images des pixels individuels gravés sur la photorésine à l'aide du SLM Epson. On remarque la forme circulaire de chaque pixel de largeur $\sim 1,3 \mu m$ sur un pas de $\sim 4 \mu m$.

1. La nouvelle forme symétrique des pixels qui simplifie grandement l'application de la sur-résolution et de précompensation.
2. La résolution qui passe de $3 \sim 5 \mu m$ à $1,25 \mu m$.
3. Le nombre de pixels qui a augmenté de 3 fois dont l'effet est direct sur la vitesse de phototraçage.

Le nouvel SLM *Epson* possède une surface transparente plus faible que celle du SLM *TL Electronics*, ce qui signifie que la lumière transmise par le nouveau SLM est globalement plus faible. En contre partie, le nouvel SLM possède un nombre de pixels nettement plus grand. Le rapport nombre de pixels - temps d'exposition est approximativement le même pour les deux écran, ce qui donne un équilibre par rapport à la vitesse de traçage en terme de surface/minute. Cependant, si on compare la vitesse de traçage en termes de nombre de pixels/seconde, on remarque que le nouveau système est nettement amélioré.

La forme et le nombre des pixels ne sont pas le seul gain obtenu en changeant le micro-écran : il existe d'autres avantages tout aussi importants mais plus subtils comme le contraste, l'effet de proximité, la résolution ...

3.6.2 Contraste

Le micro-écran Epson est connecté à l'ordinateur via une carte graphique ayant un port DVI. Ce port DVI est un port numérique grâce auquel il y

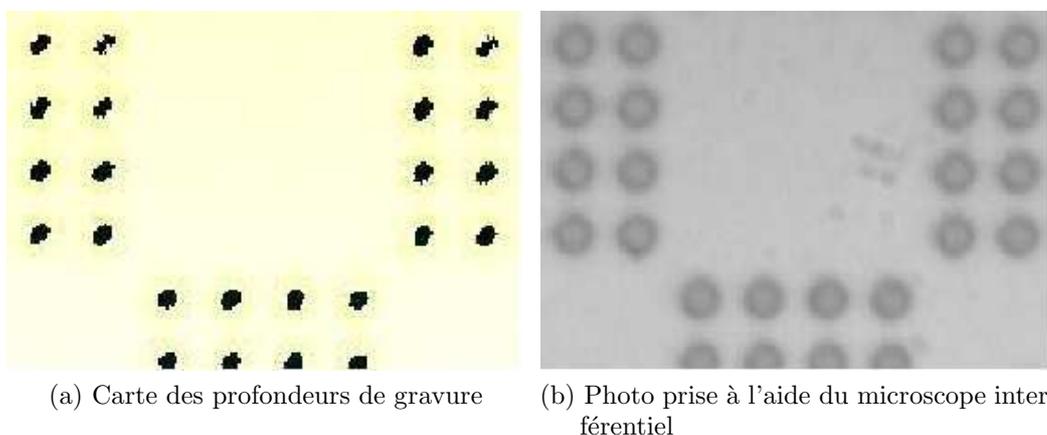


FIGURE 3.21 – Vues d'un composant test fabriqué à l'aide de l'écran *Epson*.

Sur la carte des profondeurs (figure 3.21a), les zones noires correspondent aux zones gravées et les zones jaunes aux zones non gravées.

Si l'on compare ces images à celles correspondantes pour le micro-écran *TL Electronics* (section 3.4.2, figure 3.10) on voit que les problèmes dû au manque de contraste du micro-écran *TL* aux bords des blocs de pixels noirs et blancs sont maintenant résolus.

a moins d'erreurs de transmission car on évite des conversions numérique-analogique-numérique inutiles. Le contraste général de l'image est nettement amélioré grâce au meilleur contraste de l'écran et aux avantages de la connexion numérique mais aussi grâce aux polariseurs optimisés pour le bleu plutôt que les polariseurs large-bande du micro-écran *TL Electronics*. On peut voir la différence en comparant la figure 3.21 qui montre un composant fabriqué avec le micro-écran *Epson* et la figure 3.10 qui montre un composant fabriqué avec le *TL Electronics*. L'amélioration est particulièrement visible sur les bords des zones gravées.

3.6.3 Effet de la surrésolution

Le changement du micro-écran ne conserve pas les paramètres de la surrésolution. Plus le facteur de la surrésolution augmente, meilleures sont l'uniformité de l'insolation et la résolution, mais le temps de traçage augmente car on aura besoin de plus d'insolations et de plus de micro-mouvements. Nous avons testé et comparé expérimentalement les surrésolutions 2×2 , 3×3 , 4×4 et 5×5 pour enfin choisir le meilleur compromis, qui se trouve être la surrésolution 4×4 avec une grille d'adressage simple en pratique de $1 \mu\text{m}$.

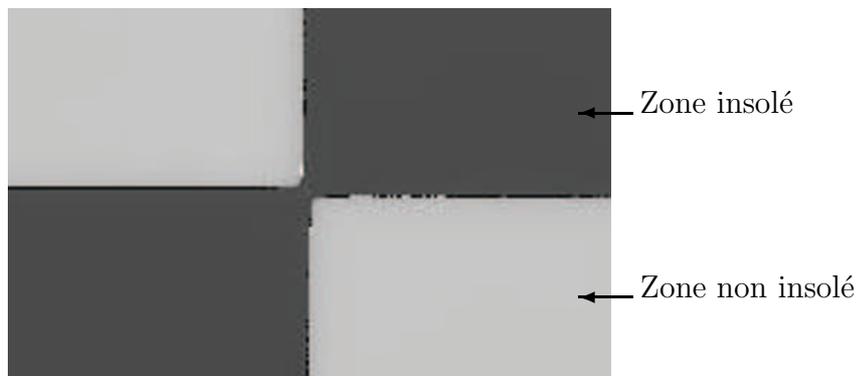


FIGURE 3.22 – Carte des profondeurs d'un composant fabriqué à l'aide du micro-écran *Epson* avec une surrésolution de 4×4 . Les zones sombres sont les zones gravées et les zones claires sont les zones non-gravées.

Cette figure montre une diminution de l'effet d'élargissement de la surface en comparaison avec le composant fabriqué avec l'écran *TL Electronics* avec une surrésolution 6×6 de la figure 3.11

Le phénomène d'élargissement des bords des motifs tracés décrit dans la section 3.4.3 ne disparaît pas. Cependant, en améliorant le contraste, et en diminuant le facteur de surrésolution l'élargissement de la zone de gravure a nettement diminué, comme le montre la figure 3.22, ce qui représente un nouvel avantage de ce modulateur. De plus, le fait que la taille du pixel tracé ($1 \mu\text{m}$) se rapproche de la grille d'adressage du phototraceur ($1 \mu\text{m}$) ainsi que

la résolution limite de l'objectif de projection ($\sim 1 \mu\text{m}$) éliminent en pratique la nécessité de la précompensation des données dans la grande majorité des cas.

3.6.4 Effet de bord du SLM

Le nouveau micro-écran que nous avons installé dans le phototraceur ne possède pas de pixels inutilisables autour de la zone active, ce qui était le cas avec le micro-écran de chez TL Electronics. Le nouveau modulateur possède un bord opaque juxtaposé aux pixels actifs, donc la partie transparente est uniquement les pixels actifs. Comme le montre la figure 3.23, nous avons obtenu uniquement l'insolation du motif désiré sans avoir de légère exposition des zones voisines aux pixels de bord d'écran inactifs comme dans la figure 3.12.

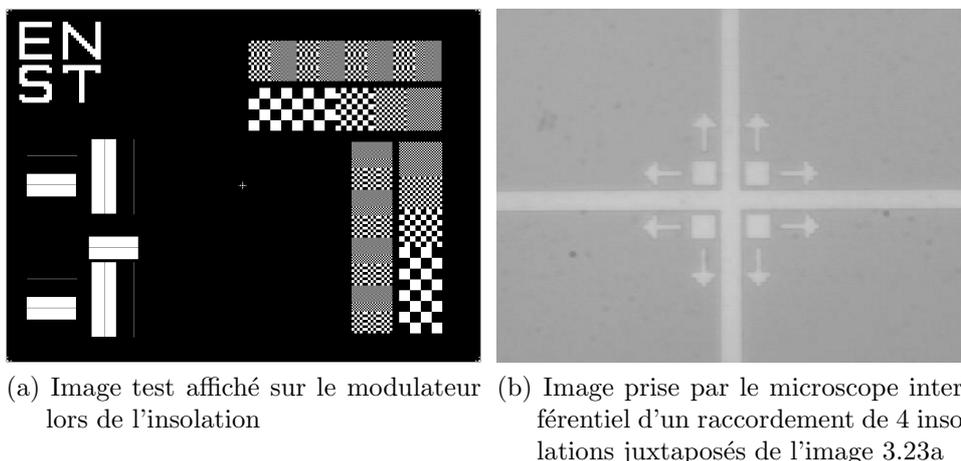


FIGURE 3.23 – Élimination de l'effet de bord de SLM avec le micro-écran *Epson* à comparer à la figure 3.12.

3.6.5 Limite de résolution

Nous avons effectué avec le nouveau SLM la même expérience de limite de résolution qu'avec le micro-écran *TL Electronics*. Cette expérience consiste à insoler l'image test montrée dans la figure 3.24a. Nous avons affiché cette image sur le micro-écran *Epson* et nous avons procédé à une insolation avec une surrésolution de facteur 4×4 dans une couche de 600 nm de photorésine. Après le développement du composant, nous avons obtenu le résultat montré à la figure 3.24b. La figure 3.25a montre l'agrandissement du premier élément de la figure 3.24b où on distingue les lignes de largeur $1 \mu\text{m}$ et séparées de $1 \mu\text{m}$. La figure 3.25b montre l'agrandissement du deuxième élément où les lignes sont de

largeur $2 \mu m$ avec un séparation de $2 \mu m$. La figure 3.26 montre la cartographie des profondeurs en 3D des lignes gravées de largeur $1 \mu m$ du composant montré dans la figure 3.25a obtenu à l'aide du microscope interférentiel.



(a) Image affichée sur le modulateur Epson lors de l'insolation



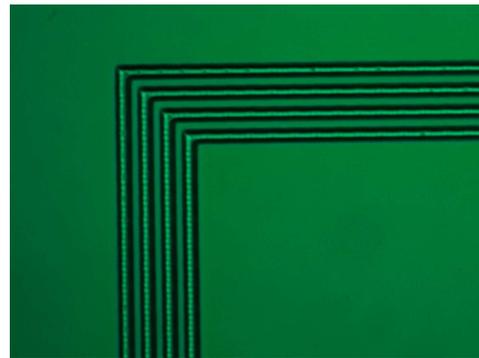
(b) Photo du composant prise à l'aide du microscope optique avec un grandissement $5x$ en affichant la figure 3.24a sur le SLM.

FIGURE 3.24 – Cette figure montre la gravure des lignes de largeur 1, 2, 3, 4 et $5 \mu m$ de gauche à droite respectivement avec un espacement de 1, 2, 3, 4 et $5 \mu m$ respectivement.

Les deux premiers motifs qui sont montrés sur la figure 3.24b ne sont pas résolus par l'objectif du microscope optique de grandissement $\times 5$, ils sont montrés sur la figure 3.25 où nous avons utilisé un autre objectif avec un grandissement $\times 100$.

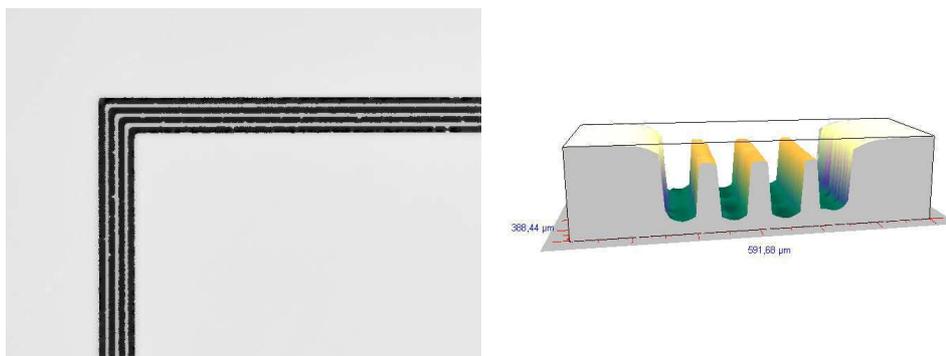


(a) Photo du premier motif de la figure 3.24b avec un grandissement $\times 100$ qui montre des lignes de $1 \mu m$ séparées de $1 \mu m$.



(b) Photo du second motif de la figure 3.24b avec un grandissement $\times 100$ qui montre des lignes de $2 \mu m$ séparées de $2 \mu m$.

FIGURE 3.25 – Photos prises au microscope optique de l'insolation qui montre la gravure des lignes à la limite de résolution du phototraceur.



(a) Photo de la carte des profondeurs : les zones noires sont gravées, et les zones grises sont non-gravées. (b) Coupe 3D de la figure 3.26a obtenue à l'aide du profilomètre.

FIGURE 3.26 – Cartographie 3D des lignes de largeur $1 \mu m$ séparées de $1 \mu m$ du composant de la figure 3.25a.

En comparant les résultats obtenus sur cette figure et la figure 3.14c, nous constatons clairement que la résolution est nettement améliorée.

Notre microscope de caractérisation a une résolution limite autour de 500 nm, ce qui signifie que les résultats obtenus dans les figures 3.26a et 3.26b sont à la limite de résolution de mesure. Pour connaître la vraie résolution de notre phototraceur il faudrait faire des mesures avec un autre type de microscope (AFM ou MEB).

Nos travaux ont permis d'obtenir une résolution de lignes gravées $1 \mu m$ avec des espacements non gravés de $1 \mu m$. Nous avons montré dans la section 3.4.5 que la résolution minimale obtenue avec l'écran *TL Electronics* est de 3 ou 5 μm suivant la direction de gravure en X ou en Y respectivement avec un espacement de $1 \mu m$ non gravé. Nous remarquons que la résolution est désormais symétrique dans les deux directions de gravure et de la valeur de $1 \mu m$ donc de 3 à 5 fois mieux en résolution. De plus le rapport $\frac{\text{résolution de gravure}}{\text{résolution d'espacement}}$ qui avait une valeur de $\frac{5 \mu m}{3 \mu m}$ devient $\frac{1 \mu m}{1 \mu m}$ ce qui signifie qu'il existe aussi une symétrie entre la résolution de la gravure et celle de l'espacement simplifiant en pratique grandement la fabrication des éléments optiques diffractifs.

3.6.6 Multiniveaux

Pour réaliser des structures 3D avec l'écran *TL Electronics* nous avons utilisé une technique de découpage de l'image en niveaux de gris en une séquence d'images binaires insolées pour des temps différents (section 3.2.2 page 63). Ceci était nécessaire car les niveaux de gris affichés par l'écran LCD n'étaient pas reproductibles photométriquement. Nous avons utilisé la même technique

avec l'écran *Epson* avec succès. Cependant, la meilleure reproductibilité des niveaux de gris et la plus grande précision de l'adressage numérique (DVI vs VGA) nous ont conduit à investiguer l'utilisation des niveaux de gris de l'écran pour réaliser les EOD multiniveaux.

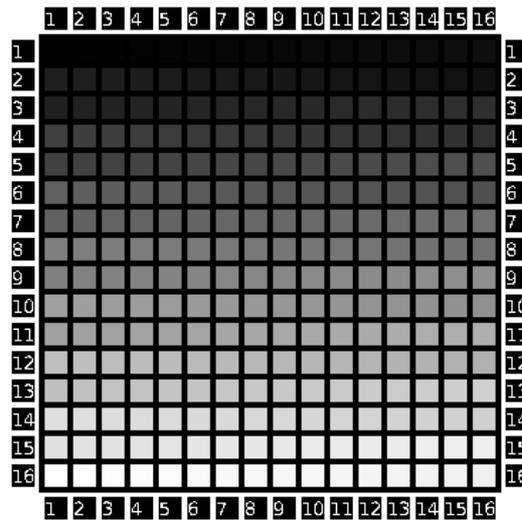


FIGURE 3.27 – Image de calibration d'insolation de niveaux de gris.

En effet, après divers tests et calibrations nous avons remarqué que les niveaux de gris affichés par l'écran *Epson* étaient beaucoup plus reproductibles photométriquement que pour l'écran *TL Electronics*. Ceci nous a permis de développer une nouvelle technique de fabrication de multiniveaux décrit ci-dessous.

Introduction de la technique

A l'aide de la librairie SDL et en se basant sur les programmes qui pilotent le phototraceur, nous avons créé un nouveau logiciel de pilotage du phototraceur qui affiche sur le micro-écran une image en niveau de gris. La fonction de réponse de la gravure de la résine en fonction du niveau de gris affiché n'est pas linéaire. C'est la raison pour laquelle nous avons dû graver simultanément tous les niveaux de profondeurs afin de faire correspondre un niveau de gris affiché à chaque niveau de profondeur gravé. Cette technique consiste à afficher l'image de calibration de la figure 3.27 sur le micro-écran puis à mesurer les profondeurs obtenues. Nous avons obtenu ainsi la profondeur gravée en fonction de chaque niveau de gris de l'écran $f(N_{Gris}) = Profondeur$.

Courbe de correspondance entre le niveau de gris affiché sur le SLM et la profondeur

Nous avons gravé l'image de la figure 3.27 sur un substrat où nous avons déposé de la photorésine S1813 avec une épaisseur de $1,2 \mu m$ pour un temps de pose constant de 1200 ms. Nous avons développé l'élément insolé pendant 2 minutes dans le développeur *MICROPOSIT 303A* avec une dilution 1 : 12 d'eau désionisée, on note que ces conditions de développement restent constantes pour toutes les expériences effectuées pour la fabrication des composants multiveaux par la méthode des niveaux de gris. Après le développement, nous avons mesuré toutes les profondeurs, puis nous avons pu établir la courbe de correspondance entre le niveau de gris et la profondeur gravée. Le graphique 3.28 montre la profondeur gravée pour chaque niveau de gris affiché.

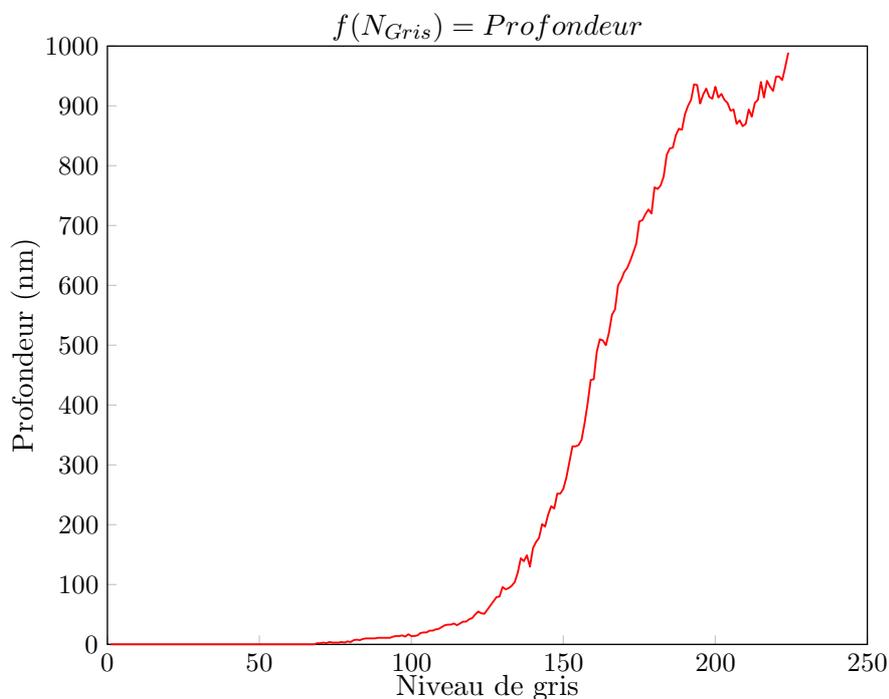


FIGURE 3.28 – Niveau de gris affiché en fonction de la profondeur gravée avec une exposition de 1200 ms

Aux alentours de la valeur 200 du niveau de gris on remarque la présence des *artéfacts*. Ces artéfacts qui se trouvent uniquement pour les grandes profondeurs de gravures ne sont pas encore complètement compris à l'heure actuelle. Nous estimons que ces artéfacts sont dûs à un ou à plusieurs des paramètres suivants : la position du pixel sur le SLM, l'uniformité de l'illumination, le parallélisme du LCD au substrat et la focalisation.

Le graphique de la figure 3.28 montre une zone approximativement linéaire entre les niveaux de gris 130 et 190, mais globalement la réponse de la résine par rapport aux niveaux de gris est non-linéaire. Afin de linéariser la réponse de la photorésine nous avons créé une *table de correspondance* (LUT^{11}) entre le niveau de profondeur de gravure désiré et le niveau de gris à afficher sur le micro-écran LCD. Cette LUT, qui est une façon reproductible de calibrer les niveaux de gris, prend comme données d'entrée l'image à afficher avec les niveaux de gris allant de 0 à 255 et la transpose sur la zone linéaire de la courbe de correspondance, en d'autres termes, l'image est affichée avec les niveaux allant de 130 à 190.

Composants Multiniveaux

Un autre avantage majeur de cette technique est qu'une fois l'ensemble micro-écran et photorésine linéarisé avec la LUT, on peut graver des EODs pour différentes longueurs d'ondes uniquement en changeant le temps de pose pour cette même LUT. Cette technique rend la réponse de gravure presque linéaire par rapport au niveau de gris affiché, donc en changeant le temps de pose pour le même motif la gravure sera plus profonde de manière proportionnelle pour chaque niveau de gris et par conséquent le composant réalisé sera optimisé pour une autre longueur d'onde. L'application de cette méthode pour fabriquer des EODs nécessite la préparation des substrats adaptés à cette expérience que j'ai détaillé dans la section 3.3.

Motif	η_0 mesuré par un laser rouge $\lambda = 633$ nm				
Temps de pose	1100 ms	1125 ms	1150 ms	1175 ms	1200 ms
TB	1,9 %	1,5 %	1,7 %	1,8 %	2,0 %
CNRS	1,8 %	1,9 %	1,7 %	1,4 %	1,4 %

TABLE 3.1 – Tableau qui montre l'efficacité de diffraction de l'ordre zéro pour des hologrammes multiniveaux tests en fonction du temps de pose pour notre nouvelle technique de fabrication par niveaux de gris. Ces mesures sont effectuées à l'aide d'un laser rouge $\lambda = 633$ nm.

Afin d'étudier l'efficacité de la LUT et de valider cette technique pour nos applications, nous avons vérifié que nous obtenons une bonne efficacité de diffraction pour les EODs fabriqués à l'aide de cette technique. Nous avons fa-

11. LUT : Look Up Table

briqué des hologrammes et des réseaux blazés tests à l'aide de cette technique, les résultats sont présentés ci-dessous.

Nous avons exposé des motifs correspondants à des hologrammes synthétisés par ordinateur (HSO) de logos de Télécom Bretagne et du CNRS avec différents temps de pose mais avec la même LUT de calibration. Nous avons ensuite mesuré l'efficacité de diffraction à l'ordre 0 ($\eta_0 = \frac{P_{diffract}}{P_{incident}}$) en utilisant un laser rouge avec $\lambda = 633$ nm et un laser vert avec $\lambda = 532$ nm. Cette mesure est un critère facilement vérifiable de la qualité de fabrication d'un EOD car pratiquement tout défaut de fabrication résulte en une augmentation de la puissance dans l'ordre zéro. Il est, de plus, le critère choisi par notre partenaire industriel, *Holotetrix*, pour déterminer les gammes de son offre commerciale d'EOD. Afin d'obtenir des hologrammes de bonne qualité nous avons cherché à optimiser l'ordre 0 en le réduisant. Les résultats de l'efficacité de diffraction η_0 que nous avons mesuré sont montrés dans les tableaux 3.1 et 3.2.

Motif	η_0 mesuré par un laser vert $\lambda = 532$ nm				
Temps de pose	1100 ms	1125 ms	1150 ms	1175 ms	1200 ms
TB	2,7 %	2,5 %	1,9 %	0,9 %	0,5 %
CNRS	2,8 %	2,3 %	1,9 %	0,7 %	0,5 %

TABLE 3.2 – Tableau qui montre l'efficacité de diffraction de l'ordre zéro pour des hologrammes multiniveaux tests en fonction du temps de pose pour notre nouvelle technique de fabrication par niveaux de gris. Ces mesures sont effectuées à l'aide d'un laser vert $\lambda = 532$ nm.

D'après les mesures de l'efficacité de diffraction montrées dans les tableaux 3.1 et 3.2, nous avons démontré que, en ajustant simplement la durée d'insolation, nous pouvons utiliser la même table de calibration (LUT) pour des longueurs d'onde différentes, dans notre cas le rouge et le vert. Donc la LUT semble indépendante de l'épaisseur de gravure désirée car elle rend la réponse de la résine linéaire. Nous avons constaté aussi que cette méthode semble beaucoup plus stable au niveau de l'affichage que notre ancienne méthode décrite dans la section 3.2.2. Notre nouvelle technique consiste à afficher une image fixe qui contient l'information de niveau de profondeur ce qui n'était pas le cas avant. Avec l'ancienne technique nous étions obligés d'afficher des images l'une à la suite de l'autre ce qui implique que les pixels passent d'un état transparent à un état opaque, il y avait donc des lapses de temps où on ne pouvait pas contrôler la puissance lumineuse transmise, ce qui limite la précision des

niveaux de gris. On note aussi que la fréquence de rafraîchissement de l'écran est de l'ordre de 50 Hz, donc afin d'afficher deux images consécutives il faut 20 ms où on ne contrôle pas l'intensité transmise. Pour que cette insolation indésirable reste négligeable et ne se cumule pas pour chaque image affichée, nous avons trouvé que l'utilisation de 16 images qui est équivalent à 16 niveaux de phase est la valeur optimale pour conserver l'efficacité de diffraction des EOD. Avec la nouvelle méthode l'image reste fixe pendant toute l'insolation donc cette limitation disparaît et nous pouvons utiliser tous les niveaux de gris qui sont dans la zone linéaire et équivalents à 60 niveaux de phase.

Nous avons aussi fabriqué des réseaux blazés de 4, 8 et 16 niveaux dont deux vues 3D obtenues à l'aide du microscope interférentiel sont montrées dans la figure 3.29. Nous avons aussi mesuré l'efficacité de diffraction η_0 et la puissance diffractée à l'ordre +1. Quelques valeurs sont données dans le tableau 3.3.

Niveau de gris	Pas du réseau (μm)	efficacité de diffraction	
		Ordre 0	Ordre +1
4 Niveaux	32	0,7 %	66,4 %
8 Niveaux	64	0,9 %	77,7 %
16 Niveaux	64	0,9 %	79,9 %

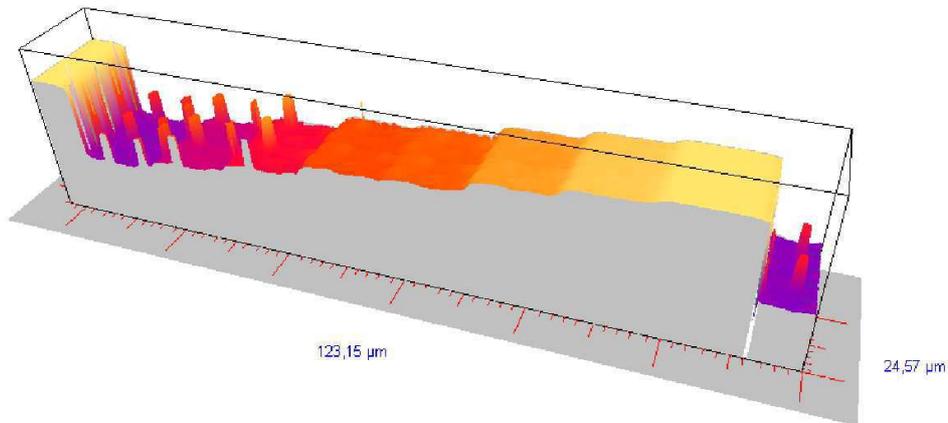
TABLE 3.3 – Tableau qui montre l'efficacité de diffraction expérimentale d'un réseau blazé de pas 32 μm et 64 μm avec une fabrication de 4, 8 et 16 niveaux. Nos substrats n'étaient pas traités anti-reflet donc l'efficacité de diffraction maximale qu'on peut obtenir est de l'ordre de 90%.

Pour un EOD commercial, notre partenaire industriel, *Holotetrix*, recherche une efficacité de diffraction η_0 de l'ordre 0 inférieure à 1%. Nous remarquons donc que toutes les valeurs de l'efficacité de diffraction à l'ordre 0 de nos composants fabriqués par cette technique sont inférieures à 1% de la puissance incidente.

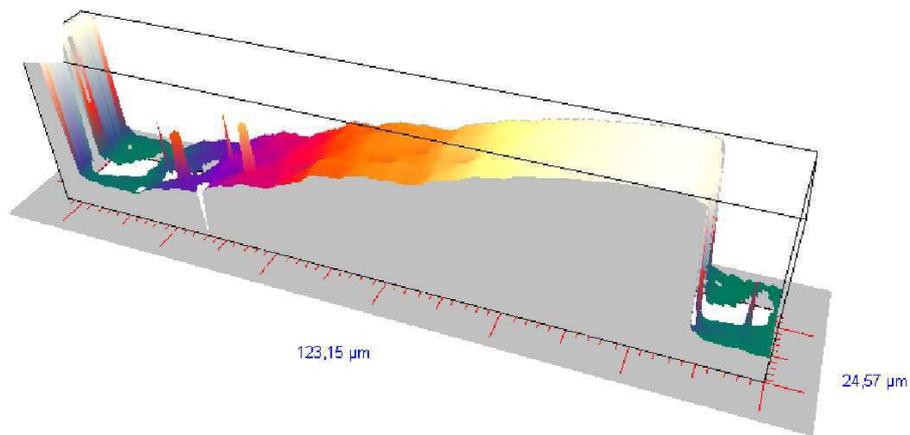
Théoriquement, l'efficacité de diffraction de l'ordre +1 pour des composants multiniveaux est calculée par l'équation :

$$\eta_1(N) = \left(\frac{\sin(\pi \frac{1}{N})}{\pi \frac{1}{N}} \right)^2 \quad (3.1)$$

Les valeurs de l'efficacité de diffraction des composants avec 4, 8, et 16 niveaux de phase sans perte de réflexion sont 81,1%, 94,9%, et 98,7% de la puissance incidente respectivement. Pour plus d'information sur le calcul de l'efficacité de diffraction voir [7–9]. Les efficacités de diffraction maximale de nos composants qui ne sont pas traités anti-reflet se rapprochent des valeurs maximales obtenables expérimentalement, démontrant la performance de cette nouvelle technique de phototraçage des EODs.



(a) Reconstruction 3D codée couleur d'un réseau blazé 8 niveaux



(b) Reconstruction 3D codée couleur d'un réseau blazé 16 niveaux

FIGURE 3.29 – Carte des profondeurs 3D obtenue par le microscope interférentiel d'un réseau blazé. Pour plus d'informations sur les artéfacts dans les images ci-dessus, veuillez consulter l'annexe B

En résumé, nous pouvons dire que cette nouvelle technique de fabrication des composants multiniveaux est validée. Elle est maintenant en cours d'utilisation au sein du département d'optique et de l'entreprise *Holotetrix*. Cette technique remplace l'affichage séquentiel des images binaires par l'affichage d'une image fixe. Afin d'avoir des composants à destination des différentes longueurs d'onde de travail, nous changeons uniquement le temps de pose global. Nous n'avons plus besoin d'adapter individuellement les temps de pose pour chaque niveau. La même technique peut aussi être utilisée indépendamment de l'épaisseur de la résine, à condition que la pré-cuisson avant l'insolation des différentes épaisseurs soit correctement contrôlée, ce qui simplifie grandement en pratique la mise en œuvre industrielle du processus de fabrication d'EODs.

De plus la nouvelle technique donne aussi accès à un nombre de niveaux de phase plus large que celle qui était utilisée précédemment.

Enfin, il y a un dernier avantage très important d'un point de vue pratique. Comme l'indiquent les tableaux 3.1 et 3.2, cette technique de fabrication a une plage de bon fonctionnement relativement grande, nettement plus grande que la technique précédente. On obtient donc un EOD dans les spécifications de η_0 beaucoup plus rapidement et avec moins d'essais de calibration. Ainsi cette avancée de première importance industrielle a un impact directe sur la rentabilité de la fabrication d'un EOD.

3.7 Conclusion

Le phototraceur massivement parallèle existant au sein du département optique de Télécom Bretagne au début de mes travaux de thèse était basé sur un micro-écran à cristaux liquides de chez *TL Electronics*. Ce micro-écran avait des pixels rectangulaires. Sa connexion à l'ordinateur se faisait via le port VGA analogique ce qui limitait le contraste des images affichées et la performance des EODs obtenus. La taille du pixel au niveau de la photorésine était de $3 \times 5 \mu m^2$, relativement grande, nécessitant une précompensation à cause de la dilatation des zones insolées. De plus, un effet d'une insolation légère se produit au bord des imargettes au fait qu'une partie des pixels du micro-écran est inutilisable et semi-transparente : encore un effet néfaste sur les structures fabriquées.

Pendant les travaux de ma thèse, j'ai remplacé le micro-écran de ce phototraceur par un micro-écran de chez *Epson*. Ce nouveau micro-écran a des pixels carrés et plus petits que le micro-écran *TL Electronics*, donnant des structures de $1 \times 1 \mu m^2$ au niveau de la photorésine donc un gain d'ordre de grandeur en résolution surfacique. En plus ce micro-écran possède le triple de pixels par rapport à l'ancien, et il se connecte à l'ordinateur via une connexion DVI : une connexion numérique. Ce micro-écran numérique possède un meilleur contraste qui résulte en moins d'erreurs d'affichage car il n'y a plus de conversion N-A-N mais par contre nous étions obligé de changer l'ordinateur pilotant le phototraceur. J'ai remplacé cet ancien ordinateur par un autre récent bien spécifique, comportant un ancien port *ISA* et un nouveau port *PCI Express*. Ce changement à posé beaucoup de problèmes surtout de compatibilité des programmes de pilotage avec le matériel. Après la remise en fonctionnement de ce nouveau système de pilotage grâce à la programmation bas niveau et à la reconfiguration du BIOS, nous avons pu fabriquer des composants EOD avec une meilleure résolution.

Nous avons aussi élaboré une nouvelle technique de fabrication des composants multiniveaux. Cette technique simplifie désormais la fabrication des EODs multiniveaux pour des longueurs d'onde différentes car il permet l'uti-

lisation d'une seule LUT de calibration. Le dépôt de résine est aussi devenu plus simple car on n'a plus besoin d'optimiser l'épaisseur pour des EODs de longueurs d'ondes de travail différentes.

Grâce à cette technique les EODs que nous fabriquons possèdent pratiquement tous une efficacité de diffraction à l'ordre zéro $\eta_0 < 5\%$ et après quelques calibrations tests, nous arrivons régulièrement à des $\eta_0 < 1\%$. En fonction de ceci, l'entreprise *Holotetrix* a pu adapter son offre commerciale et proposer une gamme de prix pour des EODs en fonction de η_0 à partir de $\eta_0 \sim 5\%$.

Nous avons également obtenu des valeurs de diffraction des réseaux blazés qui sont très proches des valeurs théoriques avec une efficacité de diffraction expérimentale de l'ordre $+1 \eta_1 > 79\%$ sur un substrat non traité anti-reflet.

Malgré ces avancées, dans l'optique de toujours aller plus loin dans les recherches sur les moyens de fabrication des EODs à structures plus petits, nous sommes retournés à la relation fondamentale (équation 1.1) dictant la résolution de la lithographie par projection. Par cette équation, on voit qu'on peut améliorer la résolution d'un système de phototraçage soit en augmentant le facteur k_1 , soit en diminuant la longueur d'onde, soit en augmentant l'ouverture numérique. Le phototraceur décrit ici fonctionne avec une lumière de longueur d'onde $\lambda = 436$ nm raie G de la lampe à vapeur de mercure, et un système de projection d'ouverture numérique 0,30. Dans notre cas, nous ne pouvons pas changer le système de projection d'optique utilisé qui est déjà optimisé, très performant et en réaliser un plus performant serait tellement couteux que cela reviendrait à fabriquer un autre phototraceur. Pour améliorer la résolution, nous ne pouvons pas non plus choisir une autre raie de la lampe à vapeur de mercure qui se situe dans l'ultra-violet car l'ultra-violet endommage les cellules de cristaux liquides. On pourrait chercher un micro-écran avec des pixels encore plus petits et pourquoi pas des gains en contraste et nombre de pixels aussi. Cependant, même supposant qu'un tel SLM soit disponible, les modifications que nous avons présenté dans ce chapitre ont poussé la résolution de ce phototraceur jusqu'à la résolution de l'objectif de projection (proche de la limite de diffraction) donc les prochaines améliorations de ce système n'apporteront que de légers gains. Afin d'avoir des dimensions critiques plus petites que celles de ce phototraceur, nous devons envisager une nouvelle approche. C'est la raison pour laquelle le département optique a décidé de fabriquer un autre phototraceur utilisant la lumière ultra-violette, donc une plus petite longueur d'onde ($\lambda \approx 350$ nm). En utilisant ce type de lumière nous sommes forcés de remplacer le micro-écran à cristaux liquides par un micro-écran à base de micro-miroirs, car les rayons ultra-violets endommagent les cellules de cristaux liquides. Il faut aussi utiliser un autre système de projection optimisé pour $\lambda = 365$ nm, et il faut refaire le schéma optique afin qu'il soit adapté aux micro-miroirs qui fonctionnent en réflexion. Les travaux de conception et montage de ce phototraceur à base de DMD sont décrites dans le chapitre 4.

Bibliographie

- [1] R. P. Melanie V. Kessels, Marwa El Bouz and K. Heggarty, “Versatile stepper based maskless microlithography using a liquid crystal display for direct write of binary and multilevel microstructures,” *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS*, vol. 6, pp. 033002–12, July 2007.
- [2] M. E. Bouz, *Etude et réalisation d’éléments micro-optiques à plusieurs niveaux de phase*. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, France, 2001.
- [3] J. J. Curry, M. Sakai, and J. E. Lawler, “Measurement of the hg distribution in a high-pressure arc lamp by x-ray absorption,” *Journal of Applied Physics*, vol. 84, no. 6, p. 3066, 1998.
- [4] M. Kessels and K. Heggarty, “Optical proximity correction for a versatile lcd based direct write maskless photoplotter,” *Microelectronic Engineering*, vol. 86, no. 12, pp. 2385 – 2391, 2009.
- [5] I. McDonagh and B. Vibber, “Svgalib,” Novembre 1999. <http://www.svgalib.org/>.
- [6] S. Lantinga, “Simple directmedia layer,” Octobre 2009. <http://www.libSDL.org/index.php>.
- [7] F. Träger, *Springer handbook of lasers and optics*. Springer, 2007.
- [8] H. P. Herzig, *Micro-Optics : Elements, Systems And Applications*, ch. 1, pp. 0–29. Taylor & Francis, 1 ed., apr 1997.
- [9] H. P. Herzig, *Micro-Optics : Elements, Systems And Applications*, ch. 3, pp. 53–85. Taylor & Francis, 1 ed., Apr. 1997.

Chapitre 4

Phototraceur DMD

Le phototraceur LCD déjà décrit dans le chapitre 3 permet de fabriquer de structures dont la résolution est de $\sim 1 \mu\text{m}$. Ce phototraceur est adapté à la fabrication des EODs et des hologrammes synthétisés par ordinateur. Les composants fabriqués par ce phototraceur sont optimisés pour les applications dans le domaine du visible et de l'infrarouge. La source lumineuse de type lampe à vapeur de mercure filtrée autour de la longueur d'onde $\lambda = 436 \text{ nm}$ utilisée dans ce phototraceur limite la gamme de matériaux photosensible utilisable avec celui-ci.

Dans le but d'améliorer encore nos moyen de fabrication des EODs, l'utilisation d'une source lumineuse fonctionnant autour de la longueur d'onde $\lambda = 350 \text{ nm}$ permettrait de graver des structures submicroniques (cf. chapitre 1) et aussi de photoinscrire des matériaux sensibles à l'ultra-violet uniquement comme les familles *Ormocer*© et *PVCi*© de propriétés optiques intéressantes.

Puisque tout le système optique de ce phototraceur, le collimateur, les filtres et l'objectif de projection, est optimisé pour la longueur d'onde 436 nm, nous ne pouvons pas changer simplement la source lumineuse de ce phototraceur. Pour pouvoir continuer à utiliser la même technique de phototraçage massivement parallèle à $\lambda = 365 \text{ nm}$ par exemple, il faudrait changer toute la partie optique du phototraceur. Ceci est possible : il existe des photorépéteurs optimisés pour les longueur d'ondes autour de 365 nm (i-line), mais cela ne servirait à rien car les modulateurs spatiaux de lumière à cristaux liquides seraient endommagés par la lumière ultra-violette. Pour cette raison, le département Optique a décidé d'utiliser à la place du micro-écran LCD une matrice réfléchissante de micro-miroirs (*Digital Micromirror Device (DMD)*) commercialisée par *Texas Instruments Inc. (TI)*. Ce DMD possède des micro-miroirs en aluminium large bande. Il existe différentes versions de DMD optimisés soit pour l'ultra-violet, soit pour le visible ou soit pour l'infrarouge. Les graphiques de transmission de ces différentes versions de DMD se trouvent à l'annexe D.

Mélanie Kessels [1] a conçu un nouveau phototraceur sur ce principe avec

une nouvelle architecture pendant ses travaux de thèse au département Optique. Le schéma optique de ce phototraceur n'est pas tout à fait identique à celui décrit dans le chapitre 3 car les DMD fonctionnent en réflexion.

Dans la section 4.1, je présente l'architecture du phototraceur DMD conçue

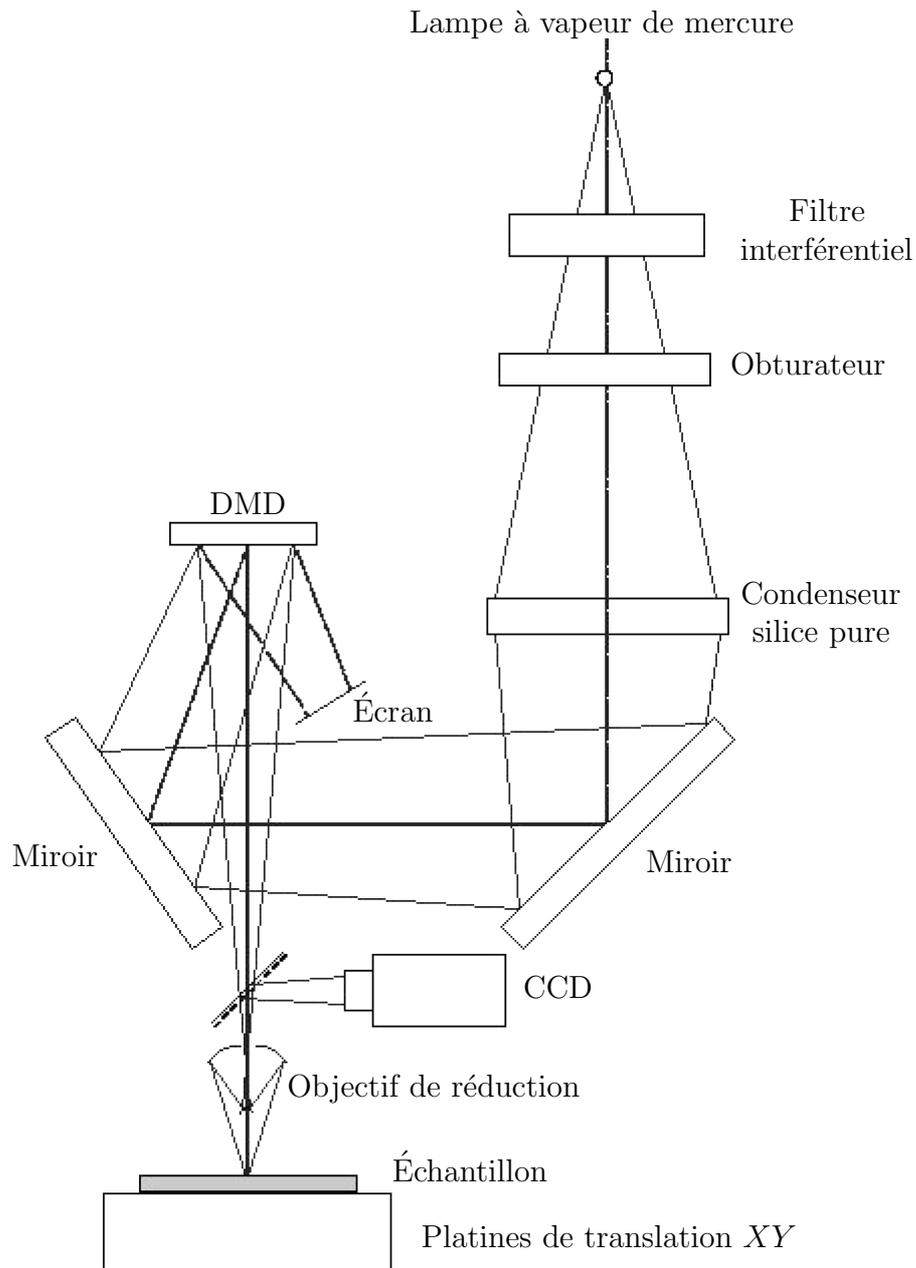


FIGURE 4.1 – Schéma de principe du phototraceur massivement parallèle à base de DMD de Mélanie Kessels.

par Kessels (figure 4.1). Ensuite, je montre dans la section 4.3 le changement de la source lumineuse effectué par Emilie Bialic [2] pendant le début de ses travaux de thèse, au département Optique de Télécom Bretagne également.

Dans le reste de ce chapitre, je décris ma contribution à la réalisation de ce phototraceur DMD, en particulier le montage d'une nouvelle optique de projection optimisée pour le fonctionnement dans le domaine de l'ultraviolet, l'intégration des nouvelles platines de translation plus précises, et la conception d'un système d'autofocus. Ces modifications nous ont permis de passer du démonstrateur de faisabilité à une machine prête pour la fabrication commerciale des EODs haute résolution.

4.1 Première version du Phototraceur DMD

Le phototraceur massivement parallèle à base de DMD a le même principe de fonctionnement que le phototraceur LCD. Il est donc constitué des mêmes composants de base. Une source lumineuse illumine le SLM dont l'image est projetée à l'aide d'un objectif de projection sur un substrat déposé sur des platines de translation.

Pour confirmer la faisabilité de cette approche, Kessels a mis en place la première version de ce phototraceur (figure 4.1), dont je détaille les éléments de base plus loin.

4.1.1 Illumination

La source lumineuse installée dans le système était une lampe à vapeur de mercure filtré autour de la longueur d'onde $\lambda = 365$ nm à l'aide d'un filtre interférentiel. Pour travailler avec des longueurs d'onde inférieures à 400 nm, il est important de choisir les éléments du système optique de façon à minimiser les pertes et les absorptions.

Les miroirs dont la face avant est en verre ont été remplacés par des miroirs de face avant en aluminium car le verre absorbe les rayons ultra-violet. Le condenseur en verre a également été remplacé par un condenseur en silice pure.

La lampe UV n'étant pas modulable, le système était doté d'un obturateur électromécanique pour illuminer le DMD seulement quand une image valide était présente.

4.1.2 SLM à micro-écran (DMD)

Le SLM à DMD est une matrice de micro-miroirs, *Digital Micromirror Device (DMD)* de chez *Texas Instruments Inc. (TI)*. Ce SLM est un micro-écran de type existant dans les vidéo projecteurs DLPTM (*Digital Light Processing*TM).

Il s'agit d'une matrice de milliers de micro-miroirs sur des circuits silicium et individuellement adressables et inclinables. Les avantages du DMD par rapport au micro-écran LCD sont la rapidité d'affichage (nombre d'images par seconde), le contraste et la large bande spectrale qui s'étend de l'ultra-violet à l'infra-rouge.

Le micro-écran utilisé dans ce phototraceur est constitué d'une matrice de 1024×768 micro-miroirs carrés de pas $13.68 \mu\text{m}$ avec un taux de remplissage optique de 85%, car l'espacement inter-pixel de ce DMD est nettement plus petit que celui des micro-écrans LCD, en particulier le LCD, Epson que nous avons utilisé dans le phototraceur LCD qui possède un taux de remplissage de 13,4% (cf. section 3.6.1).

Les micro-miroirs de ce SLM basculent sur leur diagonale d'un angle de $+12^\circ$ ou -12° , ce qui signifie que l'axe de basculement est à 45° par rapport aux axes orthogonaux de la matrice du DMD. Ces micro-miroirs peuvent être sur trois positions : *on*, *off* et *float*. La position *float* correspond à la position du repos des micro-miroirs où aucune tension est appliquée à la matrice du DMD. La position *on* correspond au cas où la lumière est réfléchiée vers le substrat et le micro-miroir est incliné sur sa diagonale à un angle de $+12^\circ$. La lumière n'est pas réfléchiée vers le substrat quand les micro-miroirs font un angle de -12° d'où le nom position *off*.

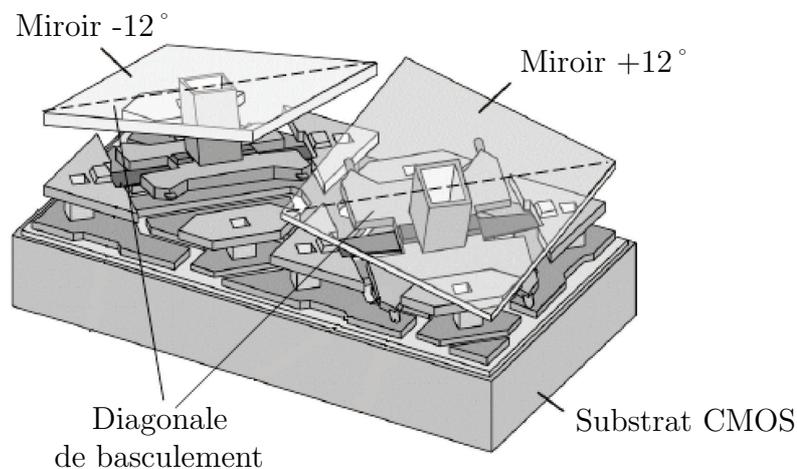


FIGURE 4.2 – Schéma de deux micro-miroirs du DMD fabriqué par TI. Ces micro-miroirs basculent sur leur diagonale sous un angle de plus ou moins 12° [3].

Avec les DMD utilisés dans un projecteur vidéo DLP, les données sont transmises au DMD à travers une carte graphique et on obtient des images couleur à l'aide d'une roue de couleur et un multiplexage temporel d'images binaires sur le DMD. Cependant, cet interfaçage ne permet pas le contrôle individuel de l'état des pixels. C'est pour cette raison que nous avons pris un DMD dans un kit de développement de chez *Vialux* qui pilote le DMD à

travers un port USB¹. Ceci a le désavantage de ralentir le transfert de données vers le DMD, un maximum 100 images binaires par seconde alors que plus de 1 kHz est possible avec un DMD, mais ce taux est suffisant pour nos besoin et surtout permet le contrôle précis de l'état de tous les pixels du DMD à tout moment.

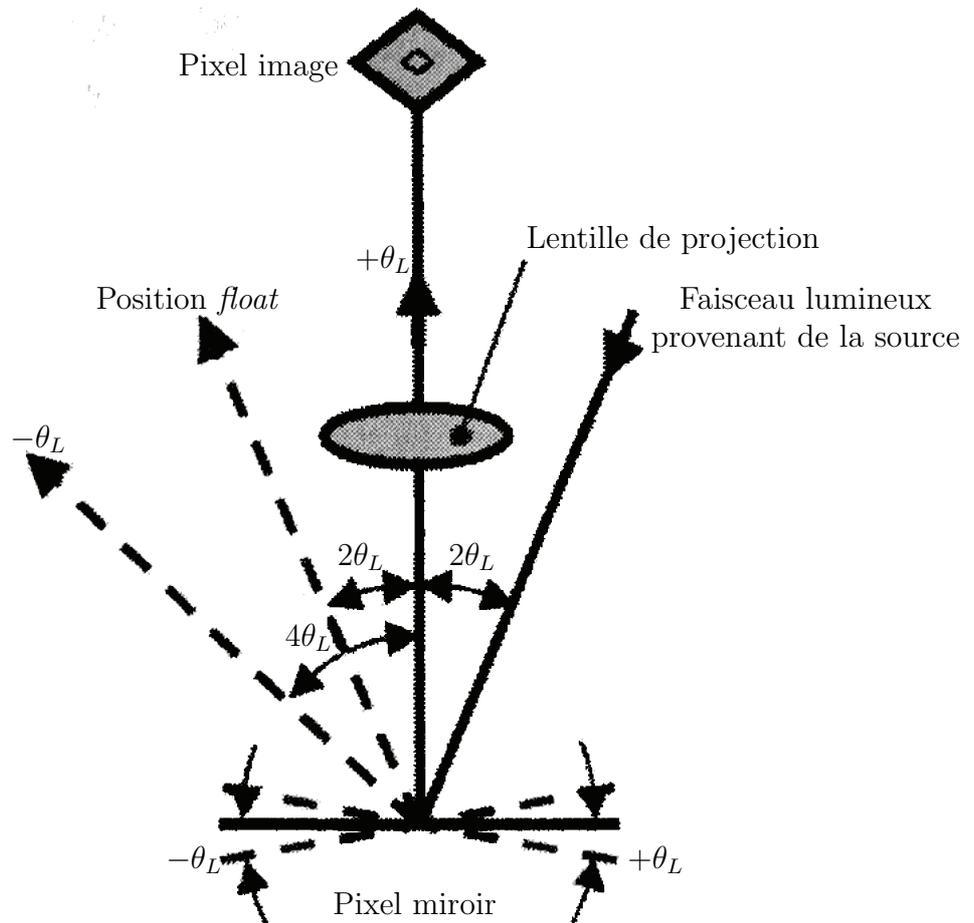


FIGURE 4.3 – Principe opération du DMD. Chaque micro-miroir est adressable individuellement en position soit *on* ($+\theta_L = +12^\circ$) soit *off* ($-\theta_L = -12^\circ$) [4]

Lors de l'affichage d'une image sur notre DMD, les données sont transmises de l'ordinateur vers la mémoire SRAM du DMD à l'aide d'une librairie dynamique fournie par le constructeur de type *dll*² fermée programmée sous le langage *Visual Basic* avec *ActiveX* sous Windows. Une fois les données chargées dans la mémoire SRAM, elles sont transmises vers les micro-miroirs. Après l'affichage de l'image, les micro-miroirs sont «verrouillés» électromécaniquement

1. USB : *Universal Serial Bus*
2. *dll* : *Dynamic-link library*

afin que la SRAM charge une nouvelle image sans affecter l'image affichée [5]. Lors de l'affichage d'une nouvelle image les micro-miroirs en position opposée uniquement se ré-orientent. Avec le DMD et l'interfaçage dont nous disposons, nous pouvons atteindre des vitesses de rafraichissement de 100 Hz. Avec une puissance lumineuse suffisante incidente sur le modulateur spatial de lumière, la vitesse de phototracage maximale théorique des composants binaires avec un DMD est donc nettement plus grande que celle avec un SLM à cristaux liquides. Cependant, puisque l'affichage sur le DMD est binaire, la vitesse de tracage des composants multiniveaux par un multiplexage d'images binaires reste plus lent avec le DMD en la comparant à notre technique décrite dans la section 3.6.6, qui consiste à afficher directement les niveaux de gris sur l'écran LCD.

Comme l'illustre la figure 4.3, le DMD doit être éclairé sous le bon angle pour que l'image réfléchi soit dirigée vers l'entrée de l'objectif de projection afin qu'elle soit focalisée sur le substrat.

4.1.3 Objectif de projection

L'image du DMD est projetée et réduite sur le substrat par un objectif de microscope. Cet objectif de microscope a été monté à l'envers de façon à réduire l'image du DMD sur le substrat. Dans le phototraceur monté par Mélanie Kessels, l'ouverture numérique de cet objectif de grandissement $\times 10$ était de 0,25. L'image du DMD était réduite 10 fois sur le substrat donnant un pixel de dimension $1,368 \times 1,368 \mu\text{m}^2$.

4.1.4 Platines de translation XY

Le phototraceur DMD était muni également de platines de translation XY de chez *Nanomotion Ltd.* qui sont entraînées par des actionneurs piézoélectriques de haute précision. Ces actionneurs poussent la platine par des à-coups de dizaines de nanomètres (pour plus d'information sur le fonctionnement de ces platines voir [6]).

Chacun des moteurs de ces platines est alimenté par un contrôleur *ACS controller* et ces deux contrôleurs sont à leur tour connectés à l'ordinateur via une carte PCI. Afin de contrôler les platines de translation le constructeur a fourni une librairie dynamique *dll* dont le rôle est de fournir des fonctions en langage C++ qui traduisent les commandes vers le langage des contrôleurs défini par le constructeur et qui est le *ACS-Tech80 (ACSPL)*.

Ces platines de translation peuvent se déplacer sur une surface de $5 \times 5 \text{ cm}^2$. Elles sont munies chacune d'une tête de lecture à base de règles optiques qui indique la position en temps réel avec une précision de 100nm [7]. Cette résolution de 100 nm n'est que la résolution de la lecture de position. Puisque ces platines fonctionnent par des à-coups, le démarrage et l'arrêt se

font de manière brusque et il est difficile d'atteindre la position consigne précisément. De plus, ces platines présentent un phénomène d'hystérésis. Pour ces deux raisons, les platines possèdent une réponse non linéaire. D'après les valeurs fournies par le constructeur, ces platines possèdent une répétabilité de ± 300 nm ceci a été vérifié par les tests de Mélanie Kessels.

Cette résolution obtenue est insuffisante pour nos besoins, en particulier pour obtenir des composants avec une résolution de 700 nm. Ces besoins et la résolution de ce problème sont décrits dans la section 4.5.3.

4.1.5 Logiciel de pilotage

Le DMD ayant des pixels de pas $13,68 \mu\text{m}$ avec un taux de remplissage de 85% possède un espacement inter-pixel de $1,07 \mu\text{m}$. Cet espacement après réduction de $\times 10$ devient 107 nm ; il n'est donc pas résolu par l'objectif de projection utilisé qui a une résolution limite d'environ $1 \mu\text{m}$. Pour cette raison, le logiciel de pilotage de ce phototraceur n'utilise pas la technique de surrésolution nécessaire dans le phototraceur LCD (section 3.2.1).

Ce logiciel a été écrit en langage *Visual C++* sous *Windows 2000* avec le compilateur *Microsoft Visual C++ 6.0*. L'interface de ce logiciel était graphique et avait pour rôle de :

1. Découper les images à tracer en imquettes de 512×512 pixels
2. Afficher chaque imquette sur le DMD
3. Déplacer les platines de translation *XY*
4. Insoler chaque imquette par l'ouverture de l'obturateur

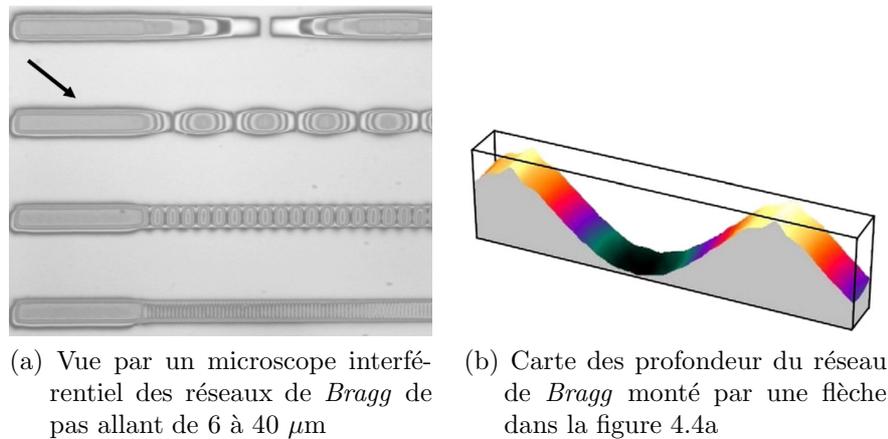
Comme pour le phototraceur LCD (section 3.2), les 3 dernières étapes se répètent jusqu'à l'insolation de toutes les imquettes afin de graver le motif désiré.

4.1.6 Composants fabriquées par ce Phototraceur DMD

J'ai contribué à la mise en place et aux tests de ce phototraceur à la fin de la thèse de Mélanie Kessels. Les résultats sont publiés dans la publication [8]. Nous avons fabriqué des composants optiques diffractifs à l'aide de ce phototraceur. La figure 4.4a montre quatre réseaux de *Bragg* longue période [9–11] de pas allant de 6 à $40 \mu\text{m}$ sur une structure guide optique de largeur de $3 \mu\text{m}$ fabriquée par ce phototraceur. La figure 4.4b montre la carte des profondeurs 3D du réseau montré par une flèche à la figure 4.4a.

4.2 État de l'art

Différents laboratoires ont travaillé aussi sur le phototraçage parallèle à l'aide des modulateurs spatiaux de lumière de type DMD.



(a) Vue par un microscope interférentiel des réseaux de *Bragg* de pas allant de 6 à 40 μm (b) Carte des profondeurs du réseau de *Bragg* monté par une flèche dans la figure 4.4a

FIGURE 4.4 – Réseaux de *Bragg* fabriqués par Kessels et *al.* [8] à l'aide du phototraceur DMD.

En 1996, Seltmann et *al.* [12] ont fabriqué leur propre modulateur qui était un miroir visco-élastique de 512×464 pixels. Un laser XeCl-excimer de longueur d'onde $\lambda = 308$ nm illuminait le SLM qui modulait la phase du faisceau lumineux incident. À l'aide d'une lentille de *Fourier* et d'une optique de réduction de 100 : 1, l'image du SLM était projetée sur le substrat afin d'obtenir une résolution de 0.6 μm . Cette technique est a priori très semblable à notre technique mais avec un SLM fait sur mesure et un nombre limité de pixels ce qui le rend très onéreux. De plus ils utilisent un laser bien spécifique qui coûte très cher.

En 2003, Chan et *al.* [13] ont choisi une lampe à arc de mercure avec un filtre laissant passer la longueur d'onde $\lambda = 435$ nm (G-line) afin d'illuminer un modulateur SVGA³ à base de micro-miroirs numériques de 848×600 pixels. Ils utilisent un système de micro-lentille pour réduire la taille des pixels. La combinaison d'un système d'imagerie afocal 1 : 3 avec les micro-lentilles et d'un deuxième système de projection de facteur 1 : 5 leur donne une résolution d'écriture 1,5 μm . La difficulté de mise en place de ce système est d'aligner les micro-lentilles avec les pixels du SLM.

Deux ans plus tard, Martinsson et *al.* [14] ont dirigé leurs recherches vers le UV profond $\lambda = 193$ nm. Ils ont fait une étude de faisabilité de l'utilisation d'un DMD de 2048×5120 pixels pour inscrire des lignes de dimensions 65, 45 et 35 nm en utilisant des facteurs de réduction très élevés à titre d'exemple $\times 200$ ou $\times 300$. Mais il faut noter que les résultats repris dans cette publication sont seulement théoriques et ne sont pas l'objet de réalisations expérimentales.

La même année, Gao et *al.* [15] ont développé une technique semblable à l'écriture directe parallèle développée par d'autres laboratoires mais ils ont

3. SVGA : Super Video Graphic Array

utilisé un DMD commercial de chez DLP⁴ de 1024×768 pixels avec une source de lumière de longueurs d'ondes $\lambda = 441,6$ nm. Leur résolution était de $3 \mu\text{m}$.

À Télécom Bretagne, nous avons cherché à améliorer les résultats du phototraceur DMD réalisé par Kessels et *al.* [8]. Les premiers travaux d'amélioration ont commencé avec Emilie Bialic [16], qui a changé la source d'illumination de ce phototraceur. Dans la section 4.3, je présente les avantages de la nouvelle lampe intégrée dans ce système par Bialic pendant le début de ses travaux de thèse, effectués au sein du département Optique de Télécom Bretagne [2]. Dans le reste du chapitre, je présente les travaux que j'ai effectués sur ce phototraceur pendant ma thèse, et ainsi que les résultats obtenus.

4.3 Remplacement de la source lumineuse

La source lumineuse utilisée pour la première version de ce phototraceur DMD était une lampe à vapeur de mercure filtré à la longueur d'onde $\lambda = 365$ nm. Un de nos buts avec ce phototraceur est d'insoler par photo-écriture directe de nouveaux matériaux comme l'*Ormocer*© et le *PVCi*. L'*Ormocer*© est photosensible à la longueur d'onde $\lambda = 365$ nm, mais le *PVCi* ne l'est pas. Afin de pouvoir insoler sur le *PVCi* et d'autres matériaux photosensibles aux longueurs d'onde autour de $\lambda = 310$ nm, Bialic a choisi de remplacer la lampe à vapeur de mercure par une lampe flash *Xenon* FX-4400 commercialisée par *Perkin-Elmer*TM. Cette lampe de large bande spectrale émet de la lumière de longueur d'onde 200 nm jusqu'à 1100 nm [17]. Le spectre de lampe est montré sur la figure C.1 de l'appendice C. Cette figure montre que cette lampe possède deux pics qui nous intéressent pour la fabrication de nos composants se situant sur les longueurs d'onde 365 nm et 436 nm, ainsi que son émission dans l'ultra-violet plus lointain, qui correspond à la plage de longueur d'onde d'insolation du *PVCi*.

La figure 4.5 montre le schéma de principe de la deuxième version de ce phototraceur. La lumière de la nouvelle lampe flash *Xenon* [18] est focalisée dans un guide de lumière. La sortie du guide est focalisée par un condenseur afin d'illuminer uniformément le DMD en réfléchissant la lumière sur le DMD à l'angle optimal par un miroir face avant en aluminium. L'image du DMD est projetée par un objectif de microscope sur le substrat.

Nous avons choisi cette lampe flash possédant un large spectre d'émission allant de 275 nm à 2000 nm afin de pouvoir insoler une grande gamme de matériaux photosensibles différents en filtrant uniquement la longueur d'onde désirée. De plus, les impulsions de la lampe flash sont de courte durée (comprise entre 2 et 6 μs) et modulables, ayant une puissance maximale par flash de 1 joule avec une cadence de 1000 Hz maximale. Ainsi, nous n'avons plus besoin d'un obturateur mécanique ce qui réduit les problèmes de stabilité et

4. DLP : Digital light processing

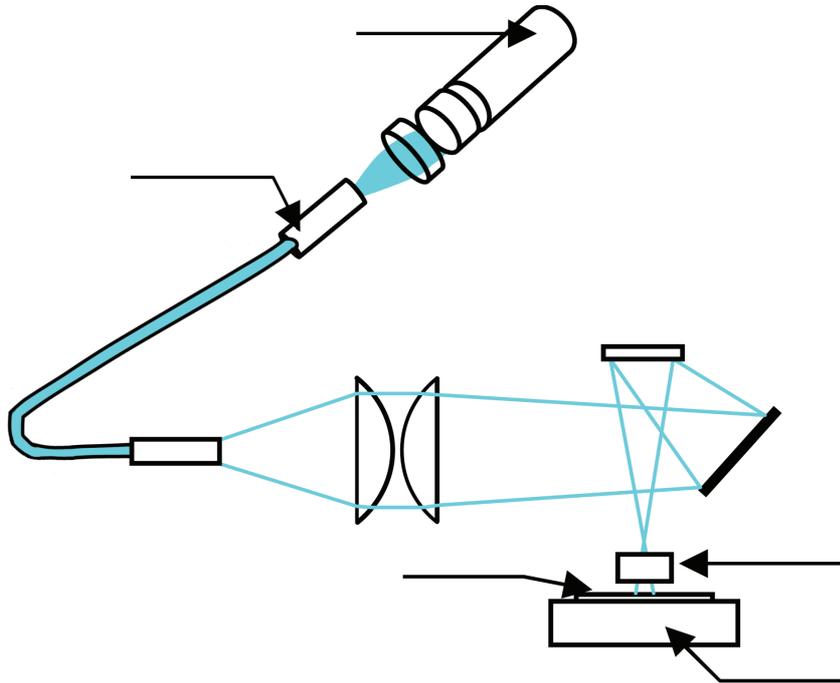


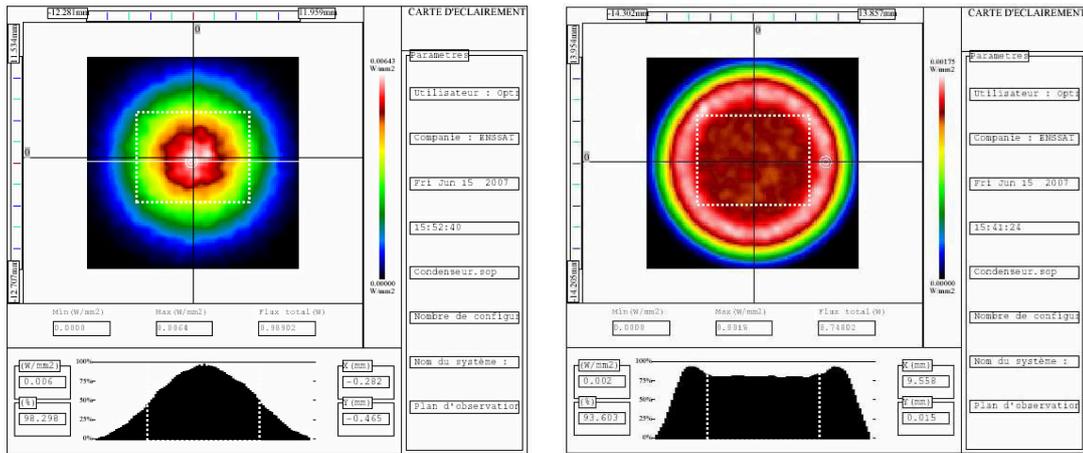
FIGURE 4.5 – Schéma de principe du phototraceur massivement parallèle à base de DMD après les modifications de Emilie Bialic [16].

rend aussi le traçage à la volée possible. Cette lampe est connectée à un boîtier qui l'alimente et qui prend comme entrée un signal créneau qui lance les flashes à chaque front montant avec une durée du flash égale à la durée de l'impulsion. Cette lampe a également deux autres avantages : son très bon rapport prix/puissance optique et sa grande durée de vie.

Le guide de lumière utilisé dans ce phototraceur est riche en fibres et commercialisé par *Polytec* [19], de référence P806-00011. Ce guide supportant des puissances de sortie élevées a une durée de vie plus longue qu'un guide de lumière rempli de liquide. Il transmet les longueurs d'onde allant de 160nm à 1200nm. En plus de transporter de la lumière, l'utilité de ce guide est d'homogénéiser l'éclairage au niveau du DMD [16]. La figure 4.6 montre la puissance lumineuse sur le DMD sans et avec ce guide. On remarque qu'avec le guide, la lumière incidente est nettement plus homogène : une inhomogénéité inférieure à 10% [1].

4.4 Limitation de ce phototraceur

Ce phototraceur, à mon arrivée, était fonctionnel mais possédait plusieurs limitations dont la tête optique, l'objectif de projection, les platines de translation et la mise au point automatique.



(a) Répartition de l'éclairement UV sur le DMD en éclairage direct (b) Répartition de l'éclairement UV sur le DMD en éclairage à travers le guide de lumière

FIGURE 4.6 – La différence d'éclairage sur le DMD avec et sans le guide de lumière [16].

Comme expliqué à la section précédente, en remplaçant la lampe à vapeur de mercure par la lampe flash, nous avons élargi la bande spectrale possible de phototraçage et les matériaux photosensibles utilisables. Nous avons également rendu obsolète l'obturateur mécanique car la puissance et le déclenchement des flashes sont contrôlables par ordinateur.

L'objectif de projection mis en place par Kessels était un objectif de microscope standard de facteur de réduction $\times 10$. Cet objectif n'étant pas optimisé pour les longueurs d'onde ultra-violettes, il introduisait de la distorsion et limitait la résolution à $1,7 \mu\text{m}$. De plus, le champ objet maximal de cet objectif correspondait à 512×512 pixels du DMD, donc nous ne pouvions pas utiliser tous les pixels du SLM. Pour ces raisons, nous avons dirigé nos recherches sur l'optimisation de cette optique de projection. Nous avons choisi de la remplacer par un objectif de projection conçu par la société *Carl Zeiss* possédant un facteur de réduction $\times 20$, optimisé pour les longueurs d'onde visibles et ultra-violettes jusqu'à 320 nm afin d'atteindre une résolution aux alentours de 700 nm . De plus, son champ de 25 mm image la totalité du DMD ayant une diagonale de 18 mm .

Les platines de translation, que Kessels a utilisées, possédaient une répétabilité de 300 nm sur un champ de déplacement de $5 \times 5 \text{ cm}^2$, et étaient lents (1 cm/s). Cette répétabilité correspondait à la moitié de la dimension critique de ce qu'on peut obtenir en utilisant le nouveau système de projection. Nous avons donc étudié la mise en place de nouvelles platines de translation ayant une précision aux alentours du dixième de la dimension critique de nos com-

posants avec, en plus un champ de translation plus grand de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ et plus rapide (5 cm/s), pour nous permettre de réaliser de grands EODs.

Toutes les améliorations que nous avons prévu d'effectuer lors de ma thèse ont rendu nécessaire un système de mise au point automatique qui ne l'était pas jusque là, mais il l'est devenu pour des raisons expliquées dans la section 4.5.4. Ce système a pour but d'assurer la focalisation de l'image du DMD sur le substrat, en particulier pour des structures supérieures à 600 nm où la focalisation sans ce autofocus ne peut être assuré que pour des surfaces d'écriture supérieures à quelques mm^2 .

4.5 Travaux d'amélioration du phototraceur UV à DMD

L'objectif de mes recherches sur le phototraceur DMD a été d'identifier et mesurer les défauts et les limitations de ce phototraceur, ainsi que de chercher et de développer des solutions à ces problèmes dans le but d'écrire des EODs submicroniques, plus grands et multiniveaux. Tout d'abord, j'ai mis en place le

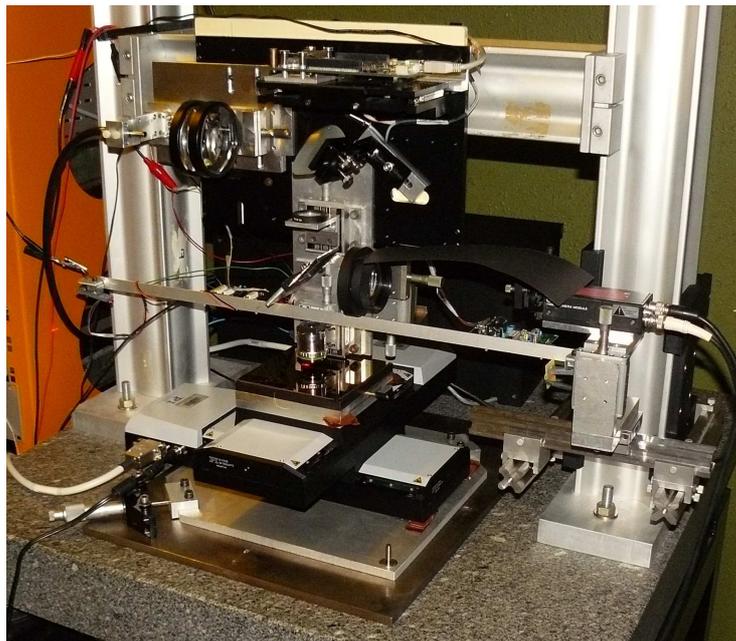


FIGURE 4.7 – Photo du phototraceur massivement parallèle à base de DMD après les modifications effectuées pendant les travaux de ma thèse.

nouveau système d'illumination, puis j'ai sélectionné l'optique de projection, que j'ai intégré dans le système. Ensuite, j'ai remplacé les platines de translation XY et enfin, j'ai conçu un système d'autofocus. Les figures 4.8 et 4.7 montrent le schéma et la photo du phototraceur mis en place. J'ai également

conçu et mis en place les interfaces électroniques nécessaires pour la source lumineuse et l'autofocus et j'ai réécrit le logiciel de pilotage du phototraceur afin qu'il soit compatible avec le nouveau système.

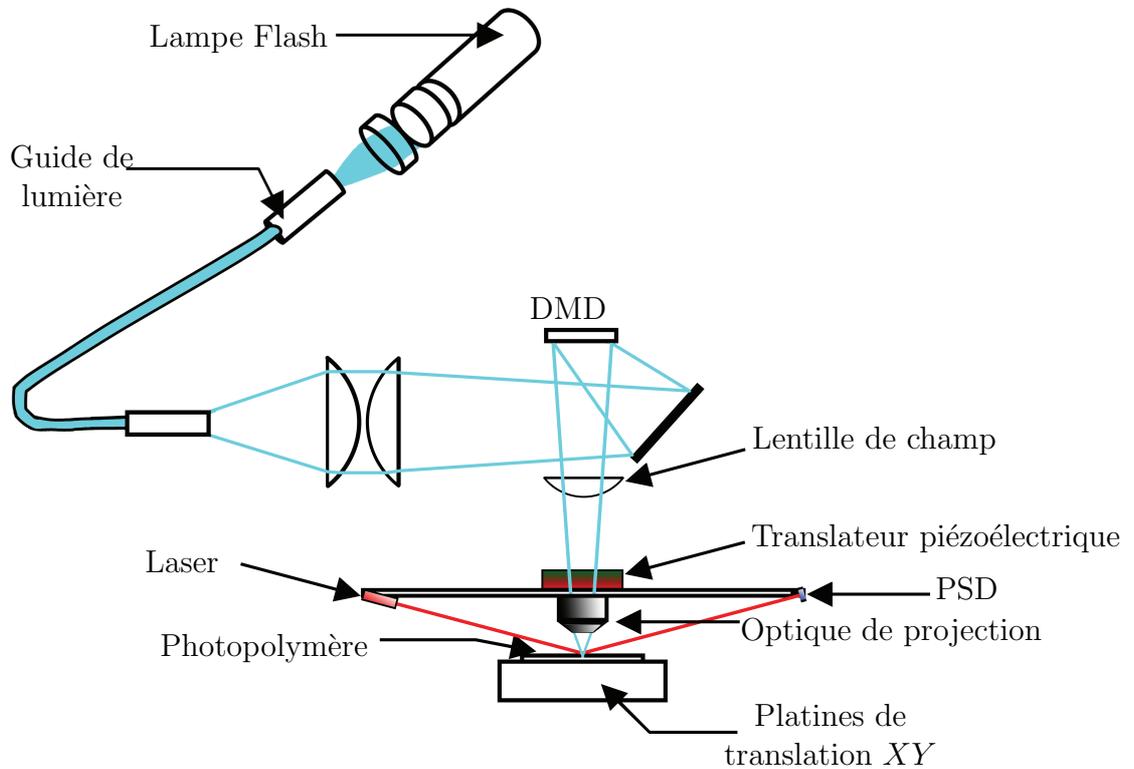


FIGURE 4.8 – Schéma de principe du phototraceur massivement parallèle à base de DMD dans l'état actuel après les modifications que j'ai effectué pendant les travaux de ma thèse.

4.5.1 Source lumineuse

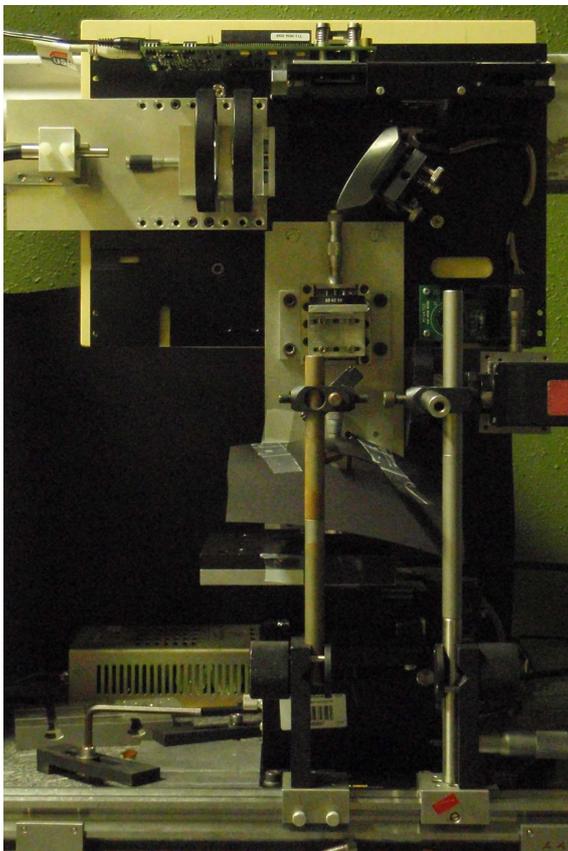
La source lumineuse flash *Xenon* décrite dans la section 4.3 nécessite un système de commande électronique et informatique qui prend en entrée les paramètres suivants : nombre des impulsions, la durée des impulsions et la période de répétition des impulsions, et génère en sortie un signal créneau déterminé par ces paramètres. J'ai conçu et fabriqué ce circuit électronique constitué principalement de deux composants : un microcontrôleur et un composant de type *MAX 232* [20]. Le *MAX* sert à rendre compatible les tensions de sorties du port serie avec les tensions d'entrée du microcontrôleur. J'ai conçu le schéma de circuit électronique de commande de la lampe à l'aide du logiciel *Eagle* [21]. Le schéma est représenté dans l'appendice C figure C.2.

Le microcontrôleur utilisé est de type PIC16F877P. Nous avons utilisé le logiciel *FlowCode 3* afin de programmer le microcontrôleur. Le programme du

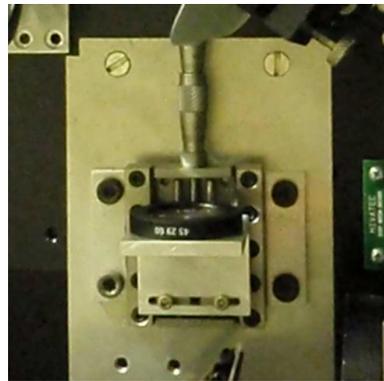
microcontrôleur communique avec l'ordinateur afin d'obtenir les paramètres du signal créneau par le port série RS232 par l'intermédiaire du *MAX*. Le microcontrôleur est également connecté à un petit écran LCD qui affiche les paramètres du signal créneau à générer.

4.5.2 Optique de projection

L'optique de projection présente dans le phototraceur initial monté par Kessels était un objectif de microscope standard de facteur de réduction $\times 10$ et d'ouverture numérique 0,25. Cet objectif a une bande passante allant de



(a) Photo du nouveau système de projection mis en place



(b) Lentille de champ



(c) Objectif de microscope

FIGURE 4.9 – La mise en place du système de projection

400 nm à 700 nm et absorbe la lumière ultra-violette. Afin d'insoler à l'aide de la lumière ultra-violette, nous avons remplacé cet objectif standard par un objectif plus performant et plus adapté à nos besoins. Pendant sa thèse, Mélanie Kessels [1] a comparé deux différents objectifs. Le premier, un EC Plan Neofluar de facteur de réduction $\times 20$, d'ouverture numérique 0,4 et de bande

passante allant de 320 nm à 1100 nm est commercialisé par *Carl Zeiss*. Le second est un objectif de microscope à miroirs, un ReffachromatTM de facteur de grandissement $\times 15$ et d'ouverture numérique de 0,58. Ce dernier est uniquement constitué de miroirs et est généralement utilisé pour travailler sur une large gamme spectrale. En éliminant les problèmes d'aberrations chromatiques et d'absorption dans le matériau, ces objectifs sont idéaux pour des applications nécessitant une excellente résolution dans l'ultraviolet. Lors des tests à l'aide de l'objectif fonctionnant en réflexion, des anneaux concentriques entourant l'image réfléchiée par le DMD sont présents dans le plan focal. Kessels a démontré que l'élimination de ces anneaux était impossible sans dégrader le contraste de l'image. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi l'objectif de microscope EC Plan Neofluar de *Carl Zeiss*.

Cet objectif étant optimisé pour une conjugaison infinie, il doit être combiné avec une lentille de champ adaptée afin d'imager le DMD de façon optimale. Cette lentille de champs de distance focale $f = 165$ mm doit être située à une distance de 110 mm de l'objectif de microscope.

Cette combinaison lentille de champ/objectif a nécessité la reconfiguration du montage mécanique du système. Nous avons mis en place le nouveau système de projection en fabriquant une nouvelle mécanique. La lentille de champ est située à une distance de 165 mm du DMD afin que le DMD soit dans le plan focal de la lentille et l'objectif de microscope à une distance de 110 mm de la lentille de champ. (cf. figure 4.9)

L'utilisation de cet objectif nous donne plusieurs avancées :

1. La possibilité d'utiliser la lumière ultraviolette en particulier les longueurs d'onde $\lambda = 310 \sim 400$ nm.
2. La diminution de la dimension critique résolvable donnant une résolution théorique de 700 nm. La réduction d'un pixel de dimension de $13.68 \mu\text{m}$ par un facteur de $\times 20$ donne une résolution théorique de 684 nm.
3. Meilleure correction des aberrations, particulièrement la distorsion.

4.5.3 Platines de translation

Les platines de translation de *Nanomotion Ltd.* possédant une répétabilité de 300 nm égale au 1/2 de la résolution de nos EOD, perturbe la diffraction par l'EOD et diminue leurs performances en terme d'erreur de l'efficacité de diffraction. En gros, il faut avoir des platines de translation avec une répétabilité aux alentours d'un dixième de la résolution des EODs. Nous avons donc décidé de remplacer ces platines de translation. Après une étude des caractéristiques et des coûts de plusieurs platines de translation sur le marché actuel, nous avons réduit le choix à deux modèles : l'un de chez *Newport* [22] et l'autre de *Physik Instrument (PI)* [23]. J'ai négocié et reçu une platine de chaque fabricant pour un mois de prêt chacune. J'ai intégré chaque platine

dans notre système afin de réaliser des essais d'insolations, et j'ai comparé les résultats obtenus par ces dernières.

Suite à ces tests, nous avons choisi les platines de translation de chez *PI* de référence M-511.HD. Ces platines de micropositionnement sont constituées d'un système hybride qui surmonte les limites des systèmes conventionnels de positionnement de précision. Elles combinent les avantages des moteurs pas à pas qui servent aux longues courses et possèdent une haute force de maintien et d'une tête piézoélectrique qui assure les translations très précises. Le M-511.HD permet des déplacements à des vitesses de 50 mm/s avec une résolution de lecture de positionnement de 2 nm, une résolution de répétabilité unidirectionnelle de 10 nm, une résolution globale tenant compte de l'uniformité des axes de translation meilleure que 80 nm, avec une capacité de charge de 50 kg (figure 4.10).



FIGURE 4.10 – La mise en place des platines de translation *PI*

Afin de fixer ces platines de translation sur le marbre qui sert de structure de base à notre système et en gardant la stabilité du système, nous avons fabriqué deux grandes plaques rectangulaires : l'une en aluminium, l'autre en acier. Ces dernières sont superposées l'une sur l'autre et sont conçues de façon à obtenir un alignement angulaire qui sert à paralléliser les axes des platines avec ceux du DMD. La plaque en acier est fixée au marbre et celle en aluminium fixe les platines de translation sur le système.

Les platines de translation sont connectées à un contrôleur fourni par *PI* de référence C-702.00, qui à son tour est relié à l'ordinateur via un port série. L'initialisation, le positionnement et la lecture de position sont obtenues ou

effectuées à l'aide d'une librairie écrite en langage C par *PI* qui communique avec le contrôleur.

4.5.4 Autofocus

L'objectif de microscope que nous avons utilisé pour projeter l'image du DMD sur l'échantillon possède une profondeur de champ de $2\ \mu\text{m}$. Plusieurs paramètres peuvent entraîner une défocalisation de l'image sur le substrat dont la variation de la planéité du substrat (de quelques centaines de nanomètres à quelques micromètres selon sa qualité), la variation de l'épaisseur du matériau photosensible déposé sur le substrat (de $500\ \text{nm}$ à $1,5\ \mu\text{m}$), la variation de planarité des axes des platines de translation (allant jusqu'à $1\ \mu\text{m}$) et le parallélisme du plan des platines au plan focal. En cumulant toutes ces variations, nous dépassons largement $2\ \mu\text{m}$. Pour ces raisons, nous avons conçu et mis en place un système de mise au point automatique en temps réel. La figure 4.11 montre le schéma de conception de ce dernier. Jusqu'à aujourd'hui, j'ai mis en place ce système mais, faute de temps, je n'ai pas pu effectuer les tests de vérification du fonctionnement. J'espère d'ici la soutenance arriver à faire fonctionner cet autofocus et obtenir des meilleurs résultats que ceux montrés dans la section 4.8. Dans la suite ce paragraphe je décris la conception et la mise en place de l'autofocus.

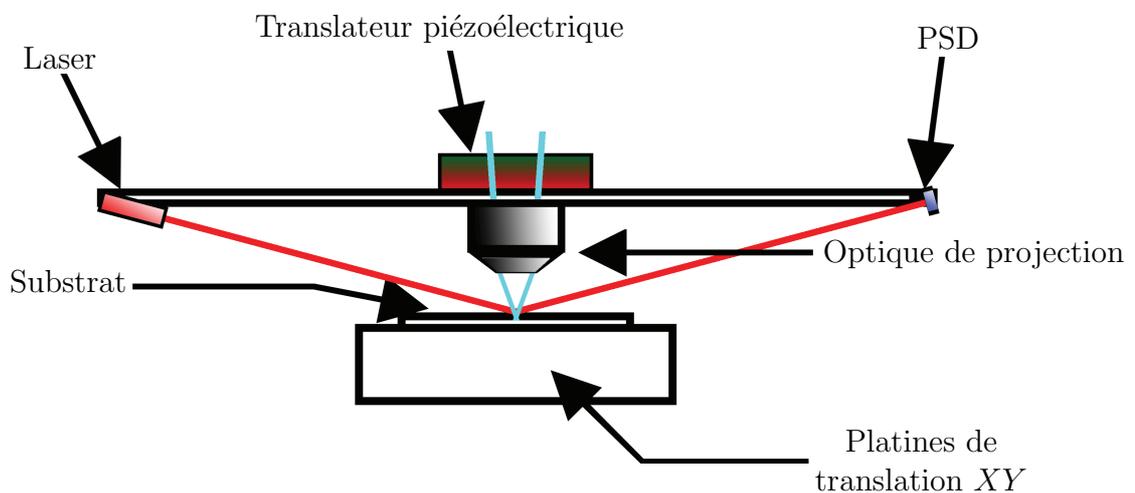


FIGURE 4.11 – Schéma représentatif de l'autofocus

Ce système est constitué d'un système d'asservissement à boucle fermée. Il contient essentiellement un laser rouge, un PSD⁵, et un translateur piézoélectrique.

5. PSD : Position Sensitive Detector

Le laser envoie un faisceau rouge (en dehors de la gamme de sensibilité du matériaux photosensible) à un angle rasant sur la surface du substrat. Le reflet arrive sur le détecteur de position PSD. Le signal du PSD varie en fonction de la position de la tête de projection. Ce signal est utilisé dans une boucle d'asservissement pour contrôler le déplacement par translateur piézoélectrique afin d'assurer la bonne mise au point du système.

Laser

Nous avons choisi un laser rouge ponctuel de divergence inférieure à $1 \mu\text{rad}$ et de longueur d'onde 633 nm . Nous avons choisi cette longueur d'onde car toutes les matériaux photosensibles que nous utilisons ne se photopolymérisent pas à cette longueur d'onde, et parce que le PSD est sensible à cette longueur d'onde.

PSD

Un PSD est un détecteur sensible à la position et est constitué d'une photodiode PIN monolithique avec une résistance uniforme dans une ou deux dimensions. Ici, on se limite à une direction qui sera la position en z . Ce détecteur est constitué de trois couches semi-conductrices de type P,I, et N. La couche inférieure, de type N, forme l'électrode commune, la couche du milieu est la couche I, et la couche supérieure, de type P, est la couche active qui est connectée à deux électrodes. La position du faisceau par rapport au centre de la photodiode est donnée par :

$$x = \frac{L}{2} \cdot \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \quad (4.1)$$

où L est la longueur du PSD, I_1 le photocourant de la première photodiode, et I_2 celui de la seconde.

Nous avons choisi un PSD commercialisé par la société *HAMAMATSU* de référence S3931 [24]. Ce PSD a une réponse spectrale de 320 nm à 1100 nm . Ce PSD est fourni également avec une électronique [25] qui transforme le photocourant en tension de sortie. La tension de sortie est nulle si le faisceau est au centre du PSD, entre 0 et 10 V s'il est du côté de la première électrode, et entre -10 et 0 s'il est de l'autre côté.

Translateur piézoélectrique

Nous avons aussi choisi le translateur P-280.30 [26] de chez PI pour assurer une translation suivant la direction z sur une distance de $100 \mu\text{m}$ avec une résolution de 1 nm .

Montage optique

Comme le montre la figure 4.11, l'objectif de microscope, le laser, et le PSD sont montés à l'aide d'un bras solide en aluminium sur le piézoélectrique. Le laser et le PSD sont fixés de part et d'autre de l'objectif à une distance de 280 mm. Le laser irradie le point focal de l'objectif de microscope sous un angle de 82° par rapport à la normale ainsi le faisceau est réfléchi vers le PSD.

Nous avons focalisé l'image du DMD sur le substrat, ensuite nous avons réglé l'angle du laser afin que sa réflexion arrive sur le centre du PSD et nous obtenons ainsi la position de focalisation avec le système de mise au point automatique.

Montage électronique

Nous avons conçu une électronique d'asservissement dont le rôle est de transformer la tension de sortie du PSD, comprise entre -10 et 10 V vers le standard nécessaire à l'entrée du piézoélectrique qui est entre -750 et 0 V.

Ce circuit est basé sur des amplificateurs opérationnels [27] qui transforment la tension du PSD de $-10 \sim 10$ V vers $0 \sim 7,5$ V. Ensuite des amplificateurs transforment cette tension en haute tension en la multipliant par un facteur de -100 pour fournir la tension de commande au piézoélectrique.

La figure 4.12 montre une photo du système mis en place et l'appendice F montre les schémas électroniques que nous avons conçus pour ce système.

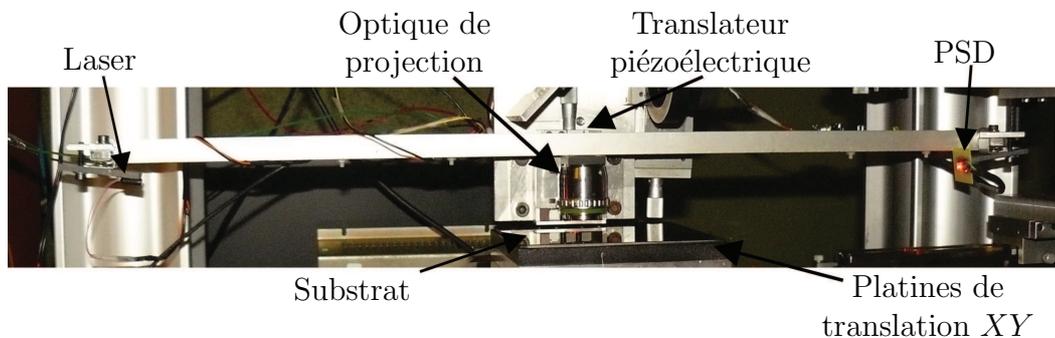


FIGURE 4.12 – Photo de l'autofocus mis en place.

4.6 Fonctionnement du phototraceur

Le logiciel qui pilotait le phototraceur de Mélanie Kessels était basé sur le même algorithme que celui qui pilote le phototraceur LCD décrit dans le chapitre 3 (section 3.2). La seule différence au niveau de l'algorithme est qu'on n'a plus besoin d'utiliser la surrésolution car ici l'espacement inter-pixel du DMD n'est pas résolu par l'optique de projection.

En résumé, le logiciel découpait l'image à insoler en imasettes de 512×512 pixels, puis une imasette était envoyée sur le DMD en même temps que les platines se déplaçaient vers la position désirée, ensuite l'obturateur s'ouvrait afin d'insoler l'imasette dès que les platines étaient en position et l'imasette entièrement affiché sur le DMD.

Dans la section 4.5, j'ai présenté les nouveaux sous-systèmes du phototraceur que nous avons mis en place. Chaque remplacement effectué sur l'un de ces sous-systèmes a nécessité une modification des routines d'interface du logiciel de commande avec les composants en question. La modification des routines de translation des platines et du déclenchement des insolutions était relativement simple. Par contre nous avons dû réécrire complètement les routines d'affichage des images sur le DMD car l'interface (*USB v/s carte graphique*) et les bibliothèques (*ddc1100ctrl v/s SDL*) fonctionnent de manière entièrement différente. Ce logiciel est programmé en langage Visual «C++» avec *ActiveX*.

4.6.1 Routines contrôlant l'affichage

J'ai modifié la routine de l'affichage des imasettes comme indiqué à la section 4.6. La routine utilisée dans le logiciel de pilotage du phototraceur LCD affiche les imasettes sur la carte graphique du PC à l'aide de la bibliothèque *SDL* car le SLM à cristaux liquides est connecté à l'ordinateur via le port *DVI*. Par contre, le DMD est connecté sur un port *USB*. Le DMD était fourni avec une bibliothèque «*ddc1100ctrl.h*» et son implémentation de type *dll*. Nous avons utilisé les 3 fonctions principales de cette bibliothèque : *floatMirrors()*, *LoadFrameBuffer(BYTE *Image)*, et *LoadReselFrame()*. La fonction *LoadFrameBuffer(BYTE *Image)* charge la variable *Image* qui contient les données de l'imasette à afficher dans la mémoire de contrôle *ActiveX* du DMD. La fonction *LoadReselFrame()* affiche les données enregistrées sur la mémoire de contrôle *ActiveX* sur les pixels du DMD afin qu'elles soient visibles. La fonction *LoadFrameBuffer* vide la mémoire de contrôle *ActiveX* et remet les pixels du DMD dans l'état *float*. L'utilisation de cette bibliothèque fait appel aux fonctions des *ActiveX* qui n'existent que sur le système d'exploitation *Windows* et sous le langage *Microsoft Visual C++*. Nous avons par conséquent réécrit tout le programme d'affichage des images.

4.6.2 Routines contrôlant les platines de translation

Nous avons utilisé la bibliothèque «*C7XX_GCS_DLL.h*» pour remplacer les routines de commande des platines de translation. Cette bibliothèque est fournie avec son implémentation sous forme de fichiers de type *dll* et *lib* par *PI*. Les principales routines utilisées par le logiciel sont : *C7XX_ConnectRS232()*,

C7XX_MOV() et C7XX_CloseConnection() (pour plus de détails sur ces routines voir l'appendice E section E.1).

Nous avons aussi utilisé d'autres fonctions comme la vérification de la position, l'affectation d'une vitesse de déplacement, l'affectation d'une accélération, et le réglage des paramètres PID.

Régulation des paramètres PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé)

Nos platines de translation possèdent, comme décrit précédemment, des servo-moteurs. Afin de mettre en route ces derniers, nous avons besoin de régler leurs paramètres, dont la vitesse, l'accélération et la force. Ces paramètres doivent être bien réglés pour assurer une opération optimale, dans notre cas un déplacement rapide et précis vers la position désirée. Pour des platines haute résolution (nanométrique) comme les nôtres, le choix des paramètres est particulièrement délicat et fait appel à des notions relativement avancées en automatique [28–31] que je décris rapidement ici.

Ce travail de réglage de paramètre PID fut effectué dans le cadre d'un stage des élèves de troisième année ingénieur à Télécom Bretagne que j'ai personnellement encadrés.

En automatique, lorsque l'on souhaite atteindre une certaine vitesse, température, position, angle... il est très souvent nécessaire d'avoir recours à un asservissement, c'est à dire un système capable d'atteindre et de maintenir une consigne en utilisant une mesure. Il s'agit donc d'un système bouclé, dont il reste à déterminer la fonction permettant de corriger la commande en fonction de la consigne initiale et de l'erreur mesurée. [29, 30]

Le PID est une méthode qui a fait ses preuves et qui donne de bons résultats. On peut citer, parmi tant d'autres, quelques exemples concrets d'utilisation : asservissement d'angle pour des bras robotiques et plus généralement dans les servomoteurs, régulation de réaction chimique en chimie pharmaceutique, convoyeurs industriels à navettes indexées, ... [31]

Dans notre cas, nous nous sommes intéressés à l'asservissement des servomoteur existant dans les platines de translation dans le cas d'une boucle fermée. Les règles optiques intégrées dans les platines permettent d'assurer la mesure de position avec une très haute résolution (2 nm). Afin d'obtenir un asservissement de position le plus rapidement possible et de diminuer l'erreur ε nous avons optimisé les paramètres PID, en particulier avec la superposition d'une des platines sur l'autre, ce qui a entraîné un dysfonctionnement de la platine du dessous car la charge sur cette platine n'était plus la même [29].

$$\varepsilon = \text{consigne} - \text{mesure} \quad (4.2)$$

Ce changement de poids sur les platines nécessite le réglage des paramètres PID afin que les platines puissent asservir la position désirée sans échec.

Paramètre P

L'asservissement de type P est le plus simple. Il s'agit d'appliquer une correction proportionnelle à l'erreur corrigeant de manière instantanée tout écart de la grandeur à régler [28, 29, 31] :

$$\text{Consigne}(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) \quad (4.3)$$

Son rôle est d'amplifier virtuellement l'erreur pour que le système réagisse plus vivement, comme si l'erreur était plus grande qu'elle ne l'est en réalité. Il permet de vaincre les grandes inerties du système et diminue le temps de montée en donnant de la puissance au moteur (plus l'erreur est grande, plus on donne de puissance au moteur). Lorsque l'on augmente K_p , le système réagit plus vite et l'erreur statique s'en trouve améliorée, mais en contrepartie le système perd en stabilité. Le dépassement de la consigne se fait de plus en plus grand, et le système peut même diverger dans le cas d'un K_p démesuré (figure 4.13).

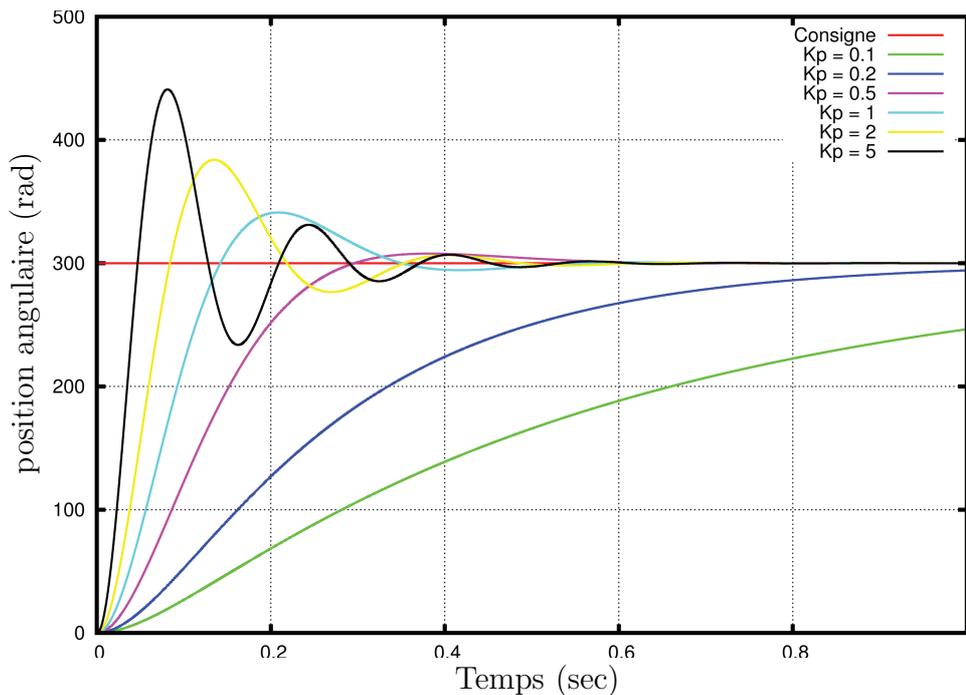


FIGURE 4.13 – Réponse temporelle de la position d'un servomoteur en variant le facteur K_p [28].

Néanmoins, il faut toujours une certaine tension aux bornes du moteur pour que celui-ci puisse tourner. C'est pourquoi, lorsque l'on s'approche de la valeur demandée, l'erreur n'est plus assez grande pour faire avancer le moteur, ce qui fait que l'on n'atteint jamais vraiment la valeur demandée. Il subsiste alors une erreur statique, qui est d'autant plus faible que K_p est grand.

Paramètres PI

L'asservissement de type PI est un asservissement de type P auquel on a ajouté un terme intégral [29, 31] :

$$\text{Consigne}(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_i \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau \quad (4.4)$$

Le terme intégral complète l'action proportionnelle puisqu'il permet de compenser l'erreur statique et d'augmenter la précision en régime permanent. L'idée est d'intégrer l'erreur depuis le début et d'ajouter cette erreur à la consigne : lorsque l'on se rapproche de la valeur demandée, l'erreur devient de plus en plus faible. Le terme proportionnel n'agit plus mais le terme intégral subsiste et reste stable, ce qui maintient le moteur à la valeur demandée.

L'intégrale agissant comme un filtre sur le signal intégré, elle permet de diminuer l'impact des perturbations (bruit, parasites), et il en résulte alors un système plus stable. Malheureusement, un terme intégral trop important peut lui aussi entraîner un dépassement de la consigne, une stabilisation plus lente, voire même des oscillations divergentes (figure 4.14).

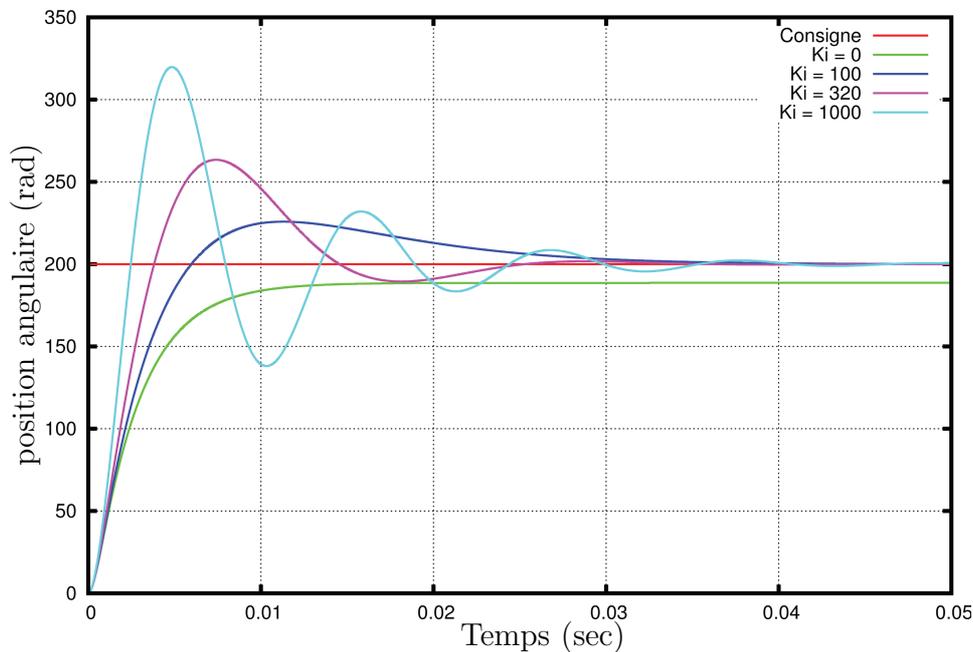


FIGURE 4.14 – Réponse temporelle de la position d'un servomoteur en variant le facteur K_i [28].

Paramètres PID

Les termes proportionnel et intégral peuvent amener un dépassement de la consigne et des oscillations. Cela implique pour le moteur des inversions de polarité, ce qui est loin d'être idéal. Pour limiter ce phénomène indésirable, on introduit un troisième élément : le terme dérivé [29, 31]. Son action va dépendre du signe et de la vitesse de variation de l'erreur, et sera opposée à l'action proportionnelle. Elle devient prépondérante aux abords de la valeur demandée lorsque l'erreur devient faible, que l'action du terme proportionnel faiblit et que l'intégrale varie peu : elle freine alors le système, limitant le dépassement et diminuant le temps de stabilisation.

$$\text{Consigne}(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_i \cdot \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{d}{dt} \varepsilon(t) \quad (4.5)$$

On obtient alors un asservissement composé d'un terme proportionnel, un terme intégral et un terme dérivé : on parle d'asservissement PID. (figure 4.15)

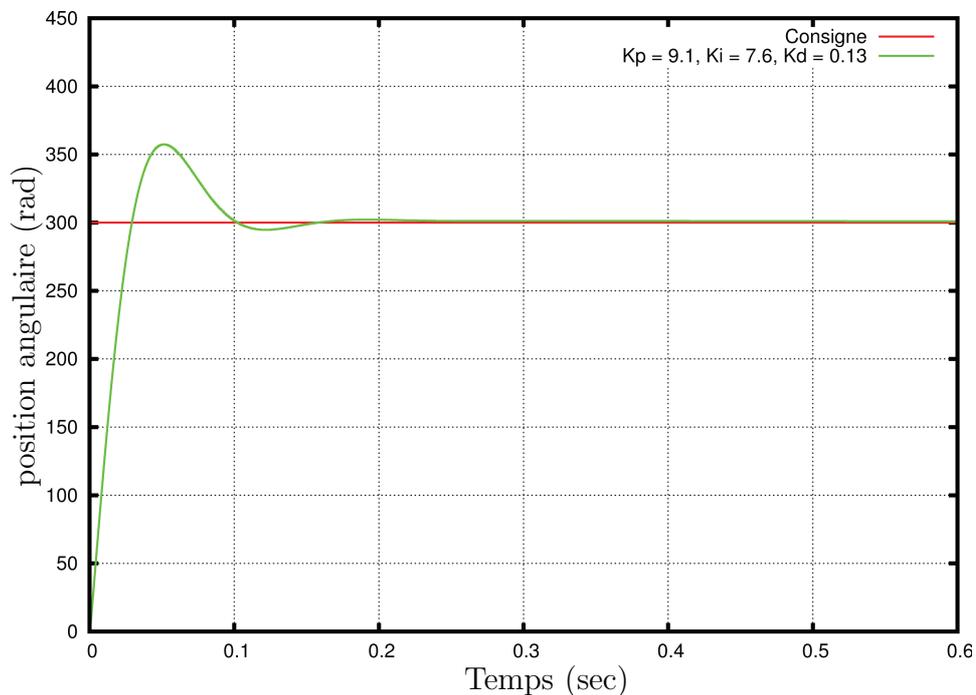


FIGURE 4.15 – Réponse temporelle de la position d'un servomoteur ayant les facteurs K_p, K_i et K_d [28].

Réglage des coefficients PID

Le réglage d'un PID consiste à trouver les meilleurs coefficients K_p , K_i et K_d dans le but d'obtenir une réponse adéquate du procédé et de la régulation. L'objectif est d'être robuste, rapide et précis tout en limitant les dépassements. Il existe différentes méthodes de détermination des paramètres PID parmi lesquelles : méthode Ziegler-Nichols, Åström et Hägglund, ... [32]

La méthode de Ziegler-Nichols indique des valeurs des coefficients permettant d'obtenir un bon compromis entre précision, rapidité et stabilité.

$$\begin{cases} K_p = 0,6.(K_p)_{lim} \\ K_i = \frac{1}{0,5.T_{osc}} \\ K_d = 0,125.T_{osc} \end{cases} \quad (4.6)$$

Ensuite, on peut légèrement faire varier ces valeurs moyennes selon le compromis précision/rapidité/stabilité recherché.

Nous avons suivi la méthode de *Ziegler-Nichols* pour retrouver les valeurs de PID. Cette méthode est très répandue dans l'industrie ou chez les automaticiens pour régler les paramètres de PID des servomoteurs. Elle a l'avantage de ne pas nécessiter de modélisation précise du système asservi, mais se contente d'essais expérimentaux, ce qui rend cette méthode très simple. Nous avons fixé K_i et K_d à 0 et on augmente le gain du correcteur proportionnel pur K_p jusqu'à obtenir des oscillations persistantes qui s'agissent plutôt d'une vibration autour de la position demandée. Nous avons mesuré alors $(K_p)_{lim}$, le gain du correcteur proportionnel au seuil de l'oscillation ce qui nous donne d'après l'équation 4.6 une valeur de $K_p = 0,6.(K_p)_{lim} = 0,025$. Comme l'oscillation était de valeur très courte, nous n'avons pas pu mesurer cette valeur, mais en suivant les équations citées ci-dessus nous avons augmenté la valeur de T_{osc} petit à petit et nous avons obtenu les valeurs : $K_i = 0.03$ et $K_d = 0,001$.

4.6.3 Routines contrôlant les insulations

Le changement de la source lumineuse pour le nouveau phototraceur 4.5.1 nous a conduit également à réécrire le module contrôlant le temps d'insolation de chaque imagerie et à resynchroniser cette insolation avec le déplacement des platines de translation et l'affichage de ces imageries sur le DMD.

Précédemment, sur le phototraceur que Kessels avait mis en place, le seul contrôle possible était la durée d'ouverture de l'obturateur. Avec la lampe flash *Xenon* nous pouvons contrôler la durée, le nombre, l'énergie et la fréquence des flashes. Le détail des fonctions que j'ai écrit pour piloter cette lampe se trouve dans l'appendice E section E.2.

4.7 Montage mécanique

Comme pour le phototraceur LCD, afin d'insoler correctement nos substrats, nous devons vérifier l'alignement mécanique de tout notre système pour :

1. assurer l'illumination uniforme du DMD aux bonnes angles pour maximiser son contraste
2. assurer le couplage optimal de la lumière réfléchie par le DMD dans l'optique de projection
3. assurer la focalisation de l'image du DMD sur l'échantillon
4. assurer le parallélisme du plan de l'image du DMD et le plan des platines de translation
5. assurer le parallélisme des axes du DMD et les axes de déplacement des platines

Nous détaillons plus loin les procédures qui nous avons effectué afin d'obtenir les résultats présentés dans la section 4.8

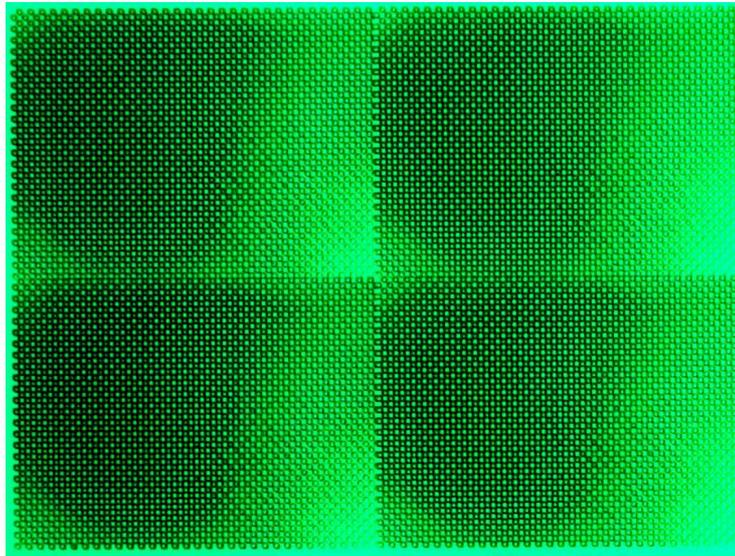
4.7.1 Illumination

Afin d'obtenir une illumination uniforme, il faut aligner le centre optique de chaque composant optique et régler les distances filtre-lentilles de collimation-DMD. Le faisceau lumineux sortant de la fibre optique doit être centré sur le collimateur et sur le miroir afin que le faisceau illumine uniformément le DMD sous un angle de 12° . Avec une distance de 95 mm entre la fibre et le collimateur, le faisceau gaussien possède une inhomogénéité inférieure à 10 % et un diamètre supérieur à la diagonale du DMD afin de maximiser la puissance lumineuse uniforme réfléchie vers le composant. La figure 4.16 montre deux insolutions : l'une où le faisceau n'illumine pas uniformément le DMD, et l'autre où le DMD est illuminé uniformément.

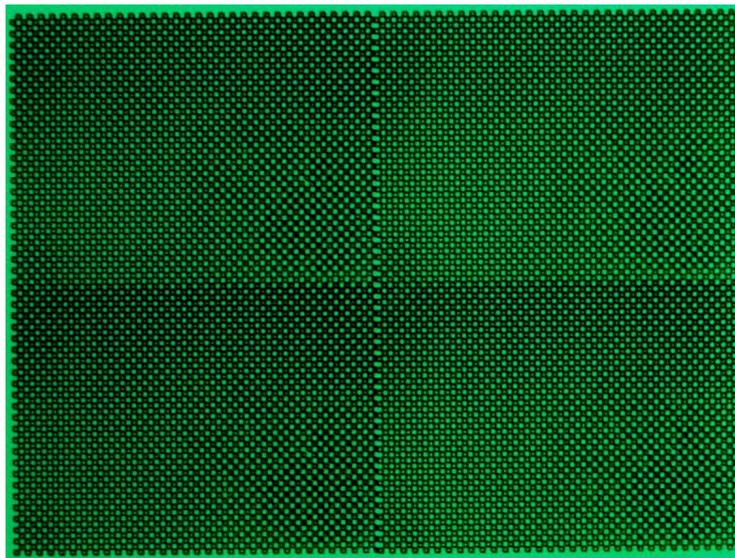
4.7.2 Mise au point

Afin de juger la mise au point avant de faire des insolutions, nous avons placé une lame de verre entre le DMD et l'objectif du microscope avec un angle de 45° par rapport à la verticale. Cette lame réfléchit l'image du DMD projetée sur le substrat vers une caméra CCD. Avant de procéder à la focalisation de l'image du DMD, nous avons tout d'abord fait coïncider les plans de l'image du DMD, la surface supérieure du substrat et le plan de la caméra en imageant un substrat en verre sur lequel se trouvait un motif en chrome.

L'objectif du microscope est monté sur une platine de translation verticale micrométrique. Nous avons donc pu à l'aide de cette platine, balayer toujours dans le même sens de la position la plus haute vers la position la plus basse



(a) Imagettes avec illumination inhomogène



(b) Imagettes avec illumination uniforme

FIGURE 4.16 – Images prises par un microscope montrant des structures tests (damier $11\ \mu\text{m} \times 11\ \mu\text{m}$) obtenus dans la photorésine dans le cas d'une illumination non uniforme et le cas d'une illumination uniforme

pour trouver la meilleure focalisation (cf. figure 4.17). Nous avons trouvé la position en regardant la netteté du motif sur le CCD. Nous nous sommes servis d'un filtre bleu lors de cette manipulation, car si on garde toutes les longueurs d'ondes émises par la lampe flash, de l'ultraviolet jusqu'à l'infrarouge, nous obtenons une image floue sur le CCD et également des composants tests insolés

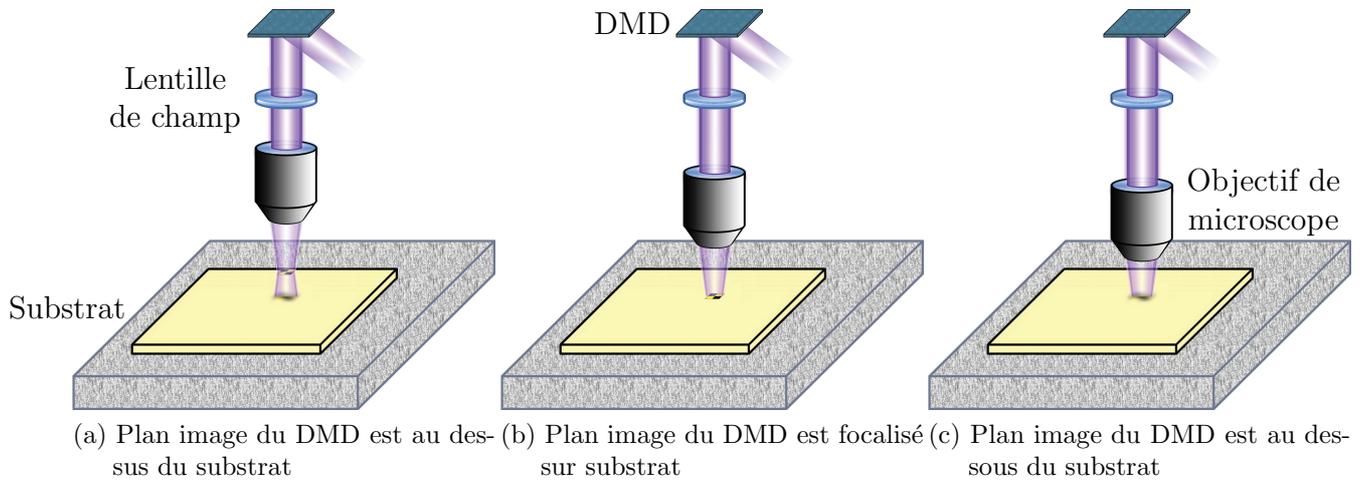
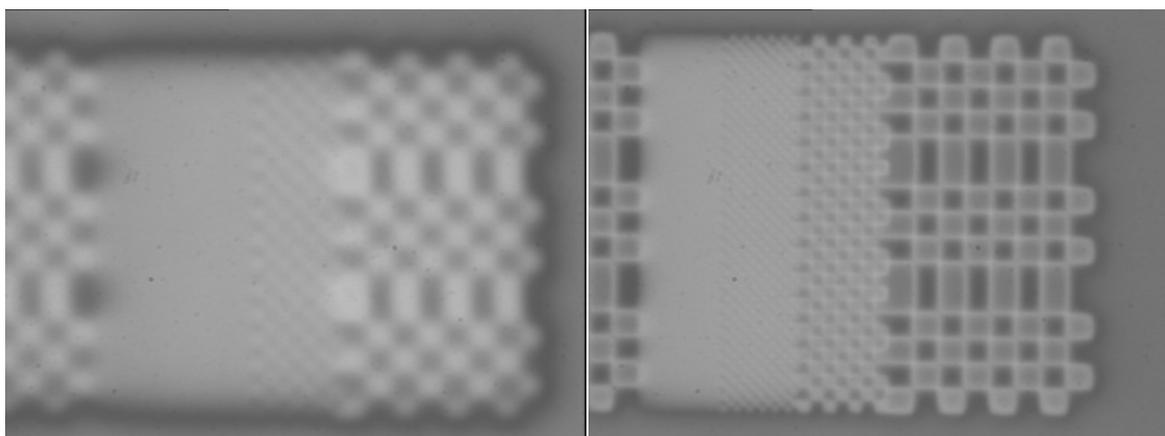


FIGURE 4.17 – Focalisation de l'image du DMD sur le substrat

floos car les différentes longueurs d'onde focalisent dans différents plans.

Sur la figure 4.18a, nous pouvons voir l'effet de l'insolation floue dans le cas d'une image du DMD incorrectement focalisée sur le substrat.

Afin d'affiner cette position, nous nous sommes servis du piézoélectrique pour effectuer les réglages nanométriques en Z . Pour garder en temps réel la focalisation, nous avons mis en place un système de mise au point automatique. (voir section 4.5.4)



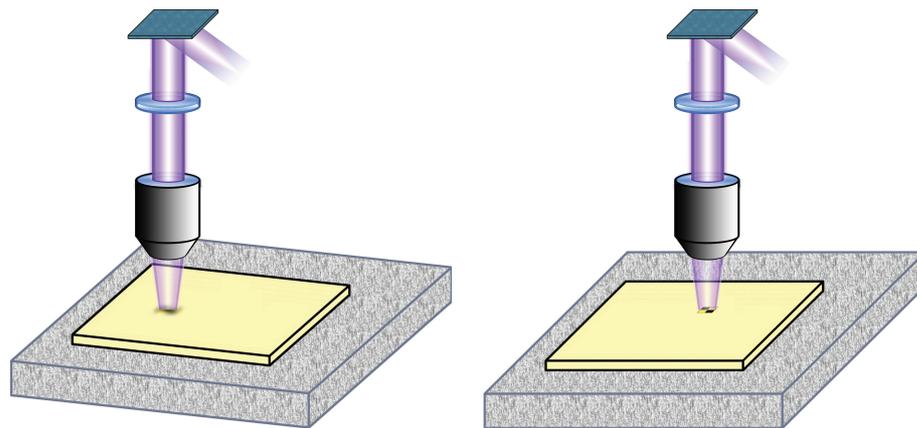
(a) Imagettes non focalisé

(b) Imagettes focalisé

FIGURE 4.18 – Différentes insolutions montrant les cas de l'image du DMD focalisé et non focalisé sur l'échantillon.

4.7.3 Parallélisme du plan des platines avec le plan image du DMD

Après la mise en place de la focalisation, une défocalisation partielle de l'image peut encore exister si le plan de platines de translation n'est pas parallèle au plan image, ce qui était le cas après la mise au point du système (cf. figure 4.19).



(a) Plan de platines de translation non parallèle au plan du DMD (b) Plan de platines de translation parallèle au plan du DMD

FIGURE 4.19 – Parallélisme des axes de translation avec le plan de focalisation

Nous avons corrigé ce non parallélisme en rajoutant des cales micrométriques sous les coins des platines. La méthode de redressement du parallélisme consiste à régler en premier l'axe qui correspond à la platine du dessous, puis le deuxième, qui correspond à la platine du dessus.

4.7.4 Juxtaposition des imagettes

Afin de graver des motifs d'une dimension plus grande que la taille de l'image du DMD, nous avons besoin de juxtaposer les imagettes et nous devons par conséquent indiquer au logiciel de pilotage du phototraceur la taille des pixels image du DMD sur le plan du substrat afin de calculer les distances de déplacement entre les imagettes. Si nous fournissons au logiciel une taille de pixel plus petite que la taille réelle, les imagettes se chevauchent (cf. figure 4.20a), si la taille est plus grande, un espace non-insolé se retrouve entre les imagettes (cf. figure 4.20b). Ce paramètre doit être mesuré expérimentalement car le grossissement n'est pas déterminé de manière suffisamment précise par le montage optique utilisé (conjugaisons...)

La taille du pixel image du DMD obtenue à l'aide de ce phototraceur est submicronique, et la limite de résolution des microscopes optiques d'observa-

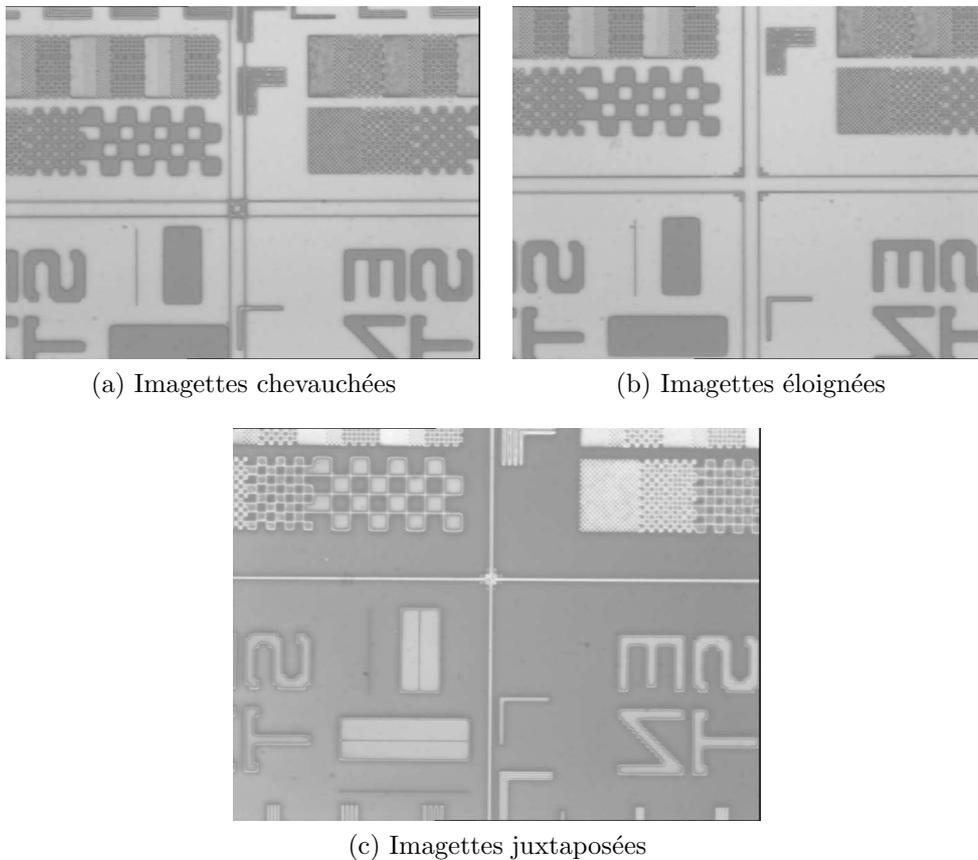


FIGURE 4.20 – Collage des imquettes, trois cas se présentent : imquettes chevauchées, imquettes juxtaposées et imquettes éloignées.

tion présent au département est aux alentours de $1 \mu\text{m}$, ce qui signifie qu'il nous est impossible de mesurer directement la taille du pixel individuel obtenu dans la photorésine. Afin d'obtenir cette valeur pour calibrer les déplacements nous avons suivi le procédé suivant :

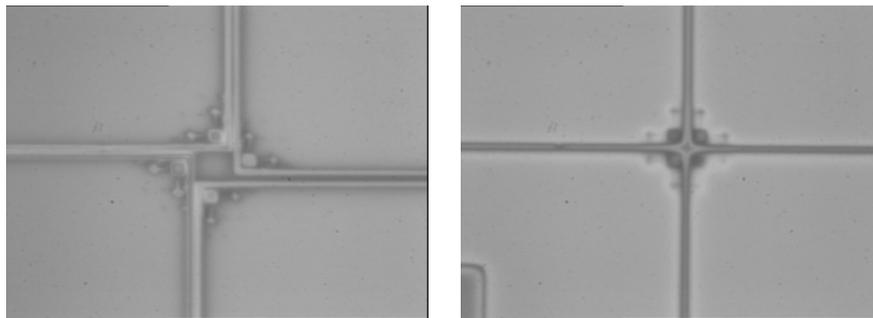
1. Nous avons tout d'abord mesuré la taille totale de l'image de l'écran (1024 pixels) qui est $720 \mu\text{m}$, et nous avons obtenu une taille de pixel de $0,7 \mu\text{m}$ ($\frac{720 \mu\text{m}}{1024 \text{ pixels}}$).
2. Puis nous avons mesuré l'écart obtenu entre les imquettes qui était de $10 \mu\text{m}$ (cf. figure 4.20b).
3. Nous avons ensuite diminué la taille nominale du pixel dans le logiciel à $0,69 \mu\text{m}$ ($0,01 \mu\text{m} = \frac{10 \mu\text{m}}{1024 \text{ pixels}}$) ce qui a produit un chevauchement de $4 \mu\text{m}$ (cf. figure 4.20a).
4. Nous avons alors répété les étapes de correction précédentes afin d'ob-

tenir un écart inférieur à 1 pixel (inférieur 700 nm) entre les imajettes.

5. Enfin nous avons obtenu une meilleure juxtaposition des imajettes pour un pixel de $0,697 \mu\text{m}$ (cf. figure 4.20c).

4.7.5 Parallélisme de l'axe des platines avec le DMD

Nous avons également remarqué un dernier réglage à effectuer lors des dernières insulations : l'angle entre l'axe du DMD et les axes des platines de translation. Comme nous l'avons fait pour le micro-écran LCD, section 3.5.1 page 74, nous avons tourné les platines avec leur réglage micrométrique afin que ses axes orthogonaux soient parallèles aux axes des platines de translation. Quand les axes ne sont pas parallèles nous obtenons des décalages entre les imajettes, comme montré sur la figure 4.21a, et quand les imajettes sont bien alignées nous obtenons le résultat de la figure 4.21b.



(a) l'angle de rotation provoque $9 \mu\text{m}$ de décalage entre les imajettes

(b) Imajettes bien alignées

FIGURE 4.21 – Insulations montrant la rotation entre les axes du DMD est les axes des platines de translation.

4.8 Résultats

4.8.1 Limite de résolution

Nous avons effectué avec le phototraceur DMD la même expérience de test de limite de résolution que nous avons effectué avec le phototraceur LCD section 3.6.5. Nous avons utilisé l'image de figure 3.24a afin de trouver la limite de résolution de photoinscription avec notre système. Le résultat est montré sur la figure 4.22. Nous avons obtenu une résolution aux alentours de 700 nm en gravant des lignes binaires de 1 pixel de pas de 2 pixels.

La résolution que nous avons obtenue est en réalité la résolution que nous avons réussi à observer à l'aide de notre microscope optique. La résolution de ce dernier est au alentours de $1 \mu\text{m}$, donc en fait, nous ne savons pas si cette résolution est la limite de résolution de fabrication ou celle du microscope d'observation. La figure 4.22a montre un faible contraste entre les lignes de $0,7 \mu\text{m}$. Ce faible contraste est certainement dû, partiellement au moins, au microscope optique. Nous avons besoin du microscope à plus fort pouvoir de résolution, par exemple un MEB ou un AFM pour effectuer de meilleures mesures mais malheureusement, nous n'avons pas ce type de microscope sur place ce qui complique de plus la définition de résolution limite de phototraceur DMD.

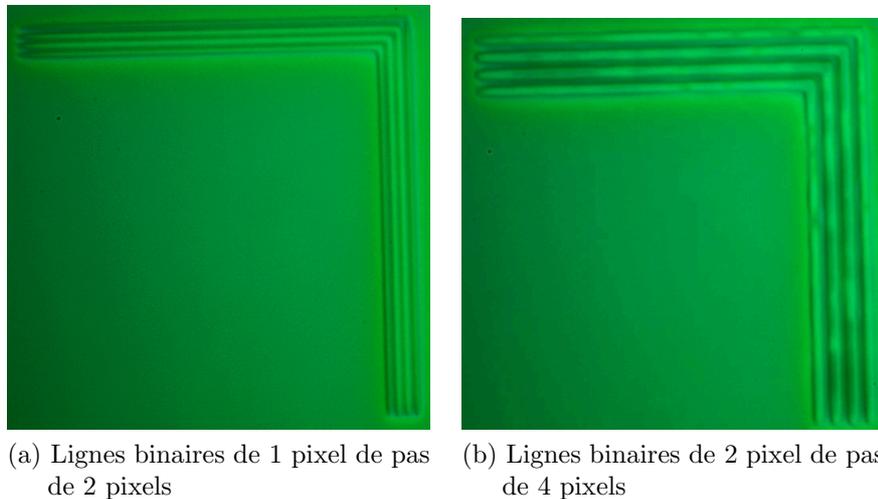


FIGURE 4.22 – Limite de résolution : photo prise par un microscope optique de grandissement $\times 100$.

4.8.2 Hologramme

Pour évaluer rapidement la capacité de fabrication des EOD qui nous intéressent par ce nouveau phototraceur, nous l'avons utilisé pour réaliser quelques EODs tests par écriture directe. La figure 4.23a montre le motif que nous avons insolé un hologramme dont la période élémentaire de 64×64 pixels de $0,7 \mu\text{m}$ chacun ce qui donne une période de $44,8 \mu\text{m}$. Nous mettons en relief la dimension du détail le plus fin qui est égale à $2 \mu\text{m}$. La figure 4.23b montre la cartographie des profondeurs de cet hologramme codé couleur.

Cet hologramme diffracte la lumière afin de former une matrice de 5×5 points (cf. figure 4.24) donnant un angle de diffraction entre les points de $3,5^\circ$. Nous remarquons que l'ordre 0 de cet hologramme est plus lumineux que les

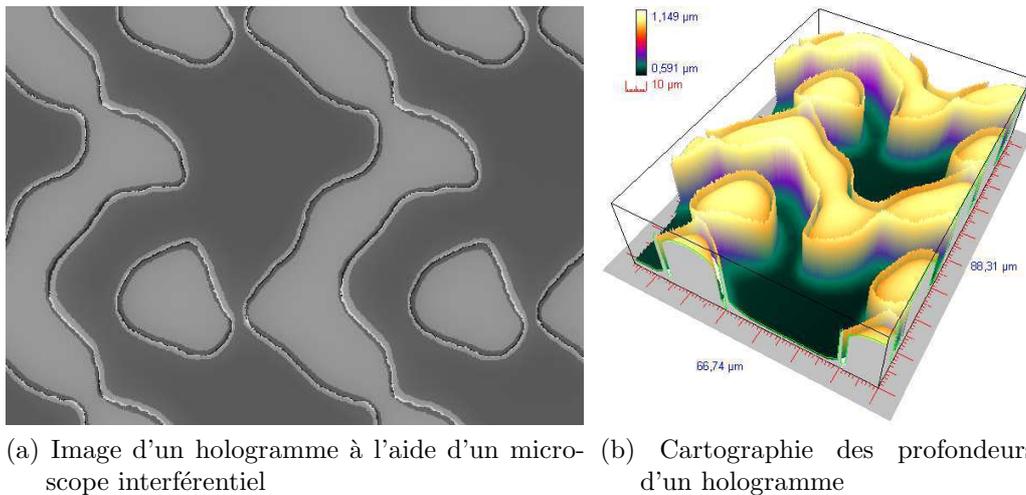


FIGURE 4.23 – Hologramme de $6 \times 6 \text{ mm}^2$ de période élémentaire de 64×64 pixels diffractant une matrice de 5×5 points.

autres points car par faute de temps nous n'avons pas pu optimiser les paramètres de fabrication de nos composants : mise au point, temps d'insolation, condition de développement.

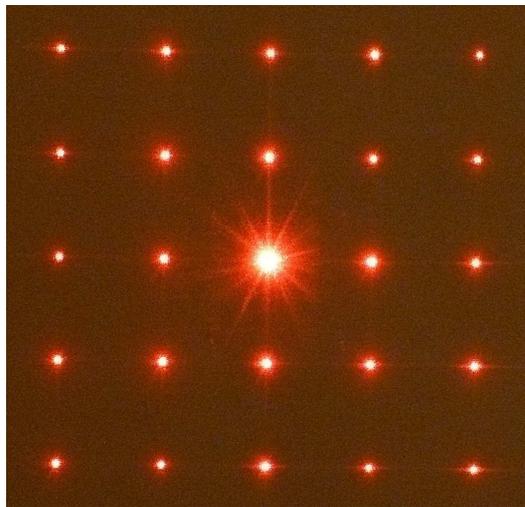


FIGURE 4.24 – Photo du plan de diffraction d'un hologramme de cellule élémentaire de 64×64 pixels qui est une matrice de 5×5 points.

Nous avons également fabriqué un autre hologramme de période élémentaire de 20×20 pixels équivalente à $14 \times 14 \mu\text{m}$ avec une dimension critique du détail le plus fin inférieur à $0,7 \mu\text{m}$ (figure 4.25). Nous avons obtenu à l'aide de cet hologramme une matrice de 5×5 points avec un angle inter-point de diffraction de $5,3^\circ$ mais actuellement, ce composant possède une efficacité de

diffraction à l'ordre 0 très élevé ayant une valeur de 18 %, faute de temps pour optimiser les paramètres de fabrication.



FIGURE 4.25 – Hologramme de 20×20 pixels diffractant une matrice de 5×5 points. Photo prise par un microscope optique de facteur grandissement $\times 100$.

Les résultats obtenus dans ce manuscrit ont été effectués sous l'irradiation de la longueur d'onde 436 nm en filtrant la lampe flash par un filtre bleu et dans la photorésine, mais l'objectif de ce phototraceur est de graver dans de nouveaux matériaux photosensibles dont l'Ormocomp. Pour cette raison nous sommes actuellement en train de faire des tests avec un filtre UV de bande passante aux alentours de la longueur d'onde 365 nm pour réaliser des motifs par écriture directe dans l'Ormocomp avec une autre thésarde du département, Aurélie Chan Yong.

Afin d'améliorer la résolution, nous sommes également en train de faire les tests de mise en place de l'autofocus que nous avons décrits dans la section 4.5.4.

Enfin, nous remarquons aussi que les bords des gravures des motifs dans la photorésine ne sont pas raides. Nous comptons donc effectuer des essais d'insolation en changeant les paramètres de développement, en particulier par l'utilisation d'un développeur binaire.

4.9 Conclusion

Nous avons vu à la fin du chapitre 3 que nous étions au bout des possibilités pratiques de l'approche de phototraçage parallèle par LCD en termes de résolution avec une résolution d'environ $1 \mu\text{m}$ et une longueur d'onde de travail de 436 nm.

Dans le but d'obtenir des structures de taille submicronique et de pouvoir utiliser d'autres matériaux photosensibles, nous avons cherché à utiliser les

longueurs d'onde dans l'ultraviolet, ce qui nous a obligé à remplacer le modulateur LCD par un modulateur DMD. Le DMD travaille en réflexion. Nous avons dû reconcevoir entièrement le système opto-mécanique et concevoir un nouveau phototraceur à base d'un DMD optimisé pour l'ultraviolet.

Une première version de ce phototraceur a été mise en place par Mélanie Kessels, qui a démontré la faisabilité de l'approche, mais qui a également mis en évidence les limitations de cette version initiale : la source lumineuse à vapeur de mercure non modulable de spectre allant de 350 à 450 nm, l'optique de projection qui n'était pas optimisée pour l'UV, les platines de translation qui possèdent une résolution de positionnement insuffisante par rapport à la résolution des composants fabriqués par ce phototraceur et enfin une profondeur de champ faible rendant nécessaire le développement d'un système de mise au point automatique.

Au début de la thèse de Emilie Bialic, une étude de remplacement de la lampe à vapeur de mercure par une lampe flash *Xénon* a été faite. Cette lampe flash nous permet d'éliminer l'obturateur mécanique et par conséquent, nous pouvons synchroniser plus facilement les flashes avec l'affichage des images sur le DMD. De plus, cette lampe possède une large bande spectrale avec une émission maximale aux longueurs d'onde 320 et 365 nm qui sont les longueurs d'onde nécessaires pour induire une réaction de photopolymérisation respectivement dans le PVCi et l'Ormocer.

Pendant mes travaux de thèse, j'ai conçu une électronique pour commander la lampe flash afin de l'intégrer dans le phototraceur. J'ai également remplacé l'optique de projection par un objectif de microscope de facteur de grossissement $\times 20$ corrigé pour la distorsion et optimisé pour l'ultraviolet. Comme ce changement n'était pas prévu dans la première version j'ai dû refaire la mécanique de support afin de mettre en place la nouvelle optique.

Nous avons insolé quelques composants tests à l'aide de cette nouvelle optique de projection nous permettant d'utiliser toute la surface du DMD et nous avons obtenu des structures avec des motifs d'une résolution d'environ 700 nm. Au vu de ces résolutions, il était clair que le remplacement des platines de translation par d'autres, possédant une précision de déplacement égale à un dixième de la dimension critique de nos composants, était nécessaire.

Après évaluation expérimentale, nous avons choisi les platines M511-HD de chez *PI* possédant une répétabilité de positionnement égale à 80 nm. La mise en œuvre de ces platines a fait appel à quelques notions de l'automatisation des systèmes servo-moteur afin de régler les paramètres PID.

Afin d'assurer une focalisation en temps réel, nous avons également conçu un nouveau système de focalisation automatique basé sur trois composants clés : un laser rouge, un PSD, et un piézoélectrique. J'ai mis en place l'autofocus, pour l'instant en cours de test, en espérant finir ces tests avant la soutenance de ma thèse.

Actuellement, à part le système d'autofocus, ce phototraceur est quasi-

opérationnel. Nous sommes capables de graver des hologrammes binaires sub-microniques avec une résolution de 700 nm avec une vitesse de traçage de 7,8 mm²/min à optimiser. Ce phototraceur peut maintenant servir d'outil pour :

- fabriquer des composants par écriture directe dans l'Ormocomp pour la thèse de Aurélie Chan Yong,
- réaliser des structures à la limite de la théorie scalaire de la diffraction qu'étudie actuellement Giang Nam Nguyen dans une thèse qui vient de démarrer en collaboration avec l'ENSPS à Strasbourg,
- nos partenaires académiques et industriels, particulièrement *Holotetrix*.

Avec la mise au point de ce phototraceur UV, le chercheur en technologie doit se reposer encore l'éternelle question : comment aller plus loin afin de pouvoir réaliser des EODs toujours plus performants ? Ce phototraceur DMD est lui aussi arrivé proche de la limite de diffraction de l'objectif de projection et la poursuite de la même approche vers les longueurs d'onde plus petites se trouve confronté aux coûts très importants des sources et des optiques UV inférieur à 300 nm et surtout l'absence de SLM commercialisé à ces longueurs d'onde. Nous avons donc cherché à changer d'approche. La nouvelle approche consiste à dépasser la limite de diffraction en combinant la technique de phototraçage parallèle avec l'absorption à deux photons. La démonstration de faisabilité de cette technique est le sujet du chapitre suivant.

Bibliographie

- [1] M. Kessels, *Techniques et dispositifs pour la photoinscription directe massivement parallèle de structures sub-microniques (2D et 3D)*. Thèse de doctorat, Télécom Bretagne, 2007.
- [2] E. BIALIC, *Étude d'un nouvel élément optique axiconique : le multiple axicon linéaire diffractif annulaire*. Thèse de doctorat, Télécom Bretagne, 2010.
- [3] M. R. Douglass, "Dmd reliability : A mems success story," in *in proceedings of SPIE*, pp. 1–11, 2003.
- [4] C. Liu, "Imaging simulation of maskless lithography using a DMD," vol. 5645, pp. 307–314, SPIE, 2005.
- [5] D. Dudley, "Emerging digital micromirror device (DMD) applications," vol. 4985, pp. 14–25, SPIE, 2003.
- [6] "Nanomotion ltd. worldwide headquarters, yokneam, israel," 2008. <http://www.nanomotion.com/>.
- [7] "Renishaw, gloucestershire, angleterre," 2008. <http://www.renishaw.com/>.
- [8] M. Kessels, C. Nassour, P. Grosso, and K. Heggarty, "Direct write of optical diffractive elements and planar waveguides with a digital micromirror device based uv photoplotter," *Optics Communications*, vol. 283, no. 15, pp. 3089 – 3094, 2010.
- [9] V. Bhatia, "Applications of long-period gratings to single and multi-parameter sensing," *Opt. Express*, vol. 4, pp. 457–466, May 1999.
- [10] T. Mizunami, Y. Sho, K. Yamamoto, and Y. Ishida, "Long-period fiber-gratings produced by exposure with a low-pressure mercury lamp and their sensing characteristics," *Optics Communications*, vol. 282, no. 24, pp. 4699 – 4705, 2009.
- [11] T. Allsop, K. Kalli, K. Zhou, Y. Lai, G. Smith, M. Dubov, D. Webb, and I. Bennion, "Long period gratings written into a photonic crystal fibre by a femtosecond laser as directional bend sensors," *Optics Communications*, vol. 281, no. 20, pp. 5092 – 5096, 2008.
- [12] R. Seltmann, W. Doleschal, A. Gehner, H. Kück, R. Melcher, J. Paufler, and G. Zimmer, "New system for fast submicron optical direct writing," *Microelectronic Engineering*, vol. 30, no. 1-4, pp. 123 – 127, 1996. *Micro- and Nano-Engineering* 95.

- [13] K. F. Chan, Z. Feng, R. Yang, A. Ishikawa, and W. Mei, "High-resolution maskless lithography," *Journal of Microlithography, Microfabrication, and Microsystems*, vol. 2, no. 4, p. 331, 2003.
- [14] H. Martinsson, T. Sandstrom, A. Bleeker, and J. D. Hintersteiner, "Current status of optical maskless lithography," *Journal of Microlithography, Microfabrication, and Microsystems*, vol. 4, no. 1, p. 011003, 2005.
- [15] Y. Gao, T. Shen, J. Chen, N. Luo, X. Qi, and Q. Jin, "Research on high-quality projecting reduction lithography system based on digital mask technique," *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 116, no. 7, pp. 303 – 310, 2005.
- [16] M. K. E. Bialic, "Phototraceur UV à micro-miroirs pour la réalisation de fonctions optiques intégrées et diffractives,"
- [17] *Perkin-ElmerTM*, "Fx-4400 high output xenon flashlamp," tech. rep. <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/perkinelmer/FX-4401.pdf>.
- [18] "High output xenon flashlamp fx4400, perkin-elmer optoelectronics." <http://www.perkinelmer.com/>.
- [19] "Omniculture high power fiber light guide." <http://www.ldgi-omniculture.com/products-high-power-fiber.php>.
- [20] "Maxim ic." <http://www.maxim-ic.com/datasheet/index.mvp/id/1798>.
- [21] "Cadsoft eagle pcb design software." <http://www.cadsoft.de/?lang=en>.
- [22] "Micro-controle spectra-physics (newport spectra -physics)." <http://www.newport.com/>.
- [23] "Physik instrument." <http://www.physikinstrumente.com/>.
- [24] *Hamamatsu*, "One dimensional psd s3931," tech. rep. http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/parts_S/s3931_etc_kpsd1002e06.pdf.
- [25] *Hamamatsu*, "Signal processing circuit for one dimensional psd s3931," tech. rep. http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/parts_C/C3683-01.pdf.
- [26] *Physik Instrumente*, "Modular piezo flexure nan positioning stages," tech. rep. <http://www.physikinstrumente.com/en/products/prdetail.php?sortnr=201000>.
- [27] R. DAMAYE, *L'amplificateur opérationnel*. Paris : EDITIONS RADIO, 1977.

-
- [28] C. L. LANN, “Le pid utilisé en régulation de position et/ou de vitesse de moteurs électriques,” tech. rep., 2007. <http://www.totofweb.net/>.
- [29] D. R. Mickaël CAMUS, Etienne DEGUINE, “Régulation par pid,” tech. rep., The Michigan Open Control and Process Textbook, 2010.
- [30] C. Sueur, P. Vanheeghe, and P. Borne, *Automatique des systèmes continus : éléments de cours et exercices résolus*. Editions TECHNIP, 1997.
- [31] C. Vibet, *Systèmes asservis linéaires continus*. Ellipses, 1987.
- [32] J. G. W. C. L. James Bennett, Ajay Bhasin, *PID Tuning Via Classical Methods*. Ellipses, 2007.

Chapitre 5

Photopolymérisation à deux photons parallèle

L'absorption à un photon est le phénomène utilisé dans toutes les applications présentées au cours des chapitres précédents. Mais, la résolution atteignable par ce phénomène, qui suit une loi linéaire d'absorption, est limitée par les lois de la diffraction optique, la section 1.2.5 du chapitre 1 décrit cette limite.

Dans le chapitre 3, nous avons obtenu une résolution de l'ordre de $1\mu m$ en utilisant une longueur d'onde d'écriture de 436 nm. Dans le chapitre 4, cette résolution est d'environ 700 nm pour une longueur d'onde de 365 nm. Ces valeurs montrent que nous avons poussé les deux phototraceurs vers leur résolution maximale possible qui correspond à la limite de la diffraction. Dans le but d'aller au delà de cette limite, nous avons cherché une autre approche, consistant à étudier les effets non linéaires d'absorption.

L'amélioration des systèmes reposant sur la réduction de la longueur d'onde devient de plus en plus onéreuse, surtout pour l'ultra-violet lointain où les matériaux optiques optimisés pour ces longueurs d'ondes, tels que la fluorine contenu dans les lentilles et les miroirs, deviennent très chers. Simultanément, le prix des SLMs devient inabordable car ils doivent être commandés sur mesure. En revanche par la voie de l'absorption à deux photons qui entraîne des effets non linéaires, la limite de diffraction peut être dépassée [1]. Ainsi, la dimension critique n'est en théorie plus limitée à des dimensions de l'ordre de la longueur d'onde.

5.1 Absorption à deux photons

Les technologies basées sur l'absorption à deux photons (ADP) sont actuellement en pleine expansion. Elle couvrent un large domaine d'application [2, 3] parmi lesquelles peuvent être citer :

- La microscopie par fluorescence biphotonique [4].
- La fabrication de laser par fluorescence pompée à deux photons.
- Le stockage optique à trois dimensions basé sur le photochromisme [5] ou la photopolymérisation par ADP [6].
- La thérapie anticancéreuse photodynamique par ADP.
- La microfabrication d'objets à trois dimensions (3D), sujet de ce travail.

5.1.1 Principe

L'apparition des lasers intenses émettant des impulsions ultracourtes de l'ordre de la femtoseconde a rendu possible l'observation ces phénomènes optiques non linéaires, tels que l'ADP. Ces effets non linéaires sont générés lorsque l'intensité du champ électrique d'une onde incidente est comparable à celle du champ responsable de la cohésion de la matière. Le champ électrique liant un électron au noyau d'hydrogène vaut typiquement 5×10^{11} V/m, alors que le champ électrique associé à l'onde émise par un laser impulsif, où les impulsions correspondent à une durée de 100 fs, une énergie de 1 mJ et de diamètre de faisceau de 1 mm, vaut 2×10^9 V/m. Cette comparaison d'ordres de grandeur permet de comprendre la liaison extrêmement forte existant entre les lasers à impulsions ultracourtes et l'électromagnétisme non linéaire. [7]

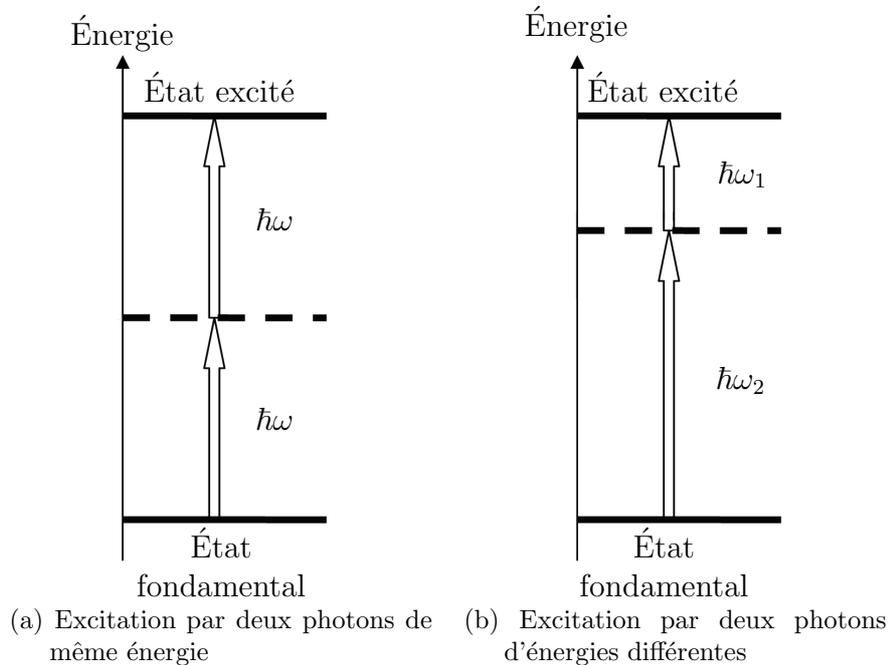


FIGURE 5.1 – Schéma du processus d'absorption à deux photons où sont mis en évidence de nouveaux états excités inaccessibles par l'absorption à un photon.

Kaiser et *al.* [8] a mis en évidence ce phénomène au début des années soixante en excitant des cristaux de $\text{CaF}_2 : \text{Eu}^{2+}$ par un laser pulsé à rubis à une longueur d'onde de 694,3 nm. L'excitation de ces cristaux a produit une fluorescence bleue qui est due à l'absorption à deux photons.

L'ADP consiste en l'absorption de deux photons simultanément par un atome ou une molécule. Ces deux photons peuvent être soit de la même énergie, soit d'énergies différentes. La figure 5.1a montre l'absorption simultanée de deux photons identiques d'énergie $E = \hbar\omega$ (avec $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, h étant la constante de Planck égale à 6.36×10^{-34} J.s et ω la fréquence angulaire de l'onde incidente). La figure 5.1b montre l'absorption de deux photons d'énergies différentes : $E_1 = \hbar\omega_1$ et $E_2 = \hbar\omega_2$. Si la somme des énergies des deux photons est égale à l'énergie correspondant à une transition électronique, le phénomène d'absorption à deux photons a lieu. [9]

5.1.2 Coefficient d'absorption non-linéaire

Le phénomène d'absorption à deux photons est pris en compte par l'introduction d'un coefficient d'absorption non linéaire. Ce coefficient apparaît dans la formule de la variation de l'éclairement I (W/m²) d'un faisceau se propageant dans la direction z dans un milieu absorbant, qui s'écrit sous la forme :

$$\frac{\partial I}{\partial z} = -\alpha_1 I - \alpha_2 I^2 \quad (5.1)$$

où α_1 représente le coefficient d'absorption linéaire à un photon et α_2 le coefficient non linéaire de l'absorption à deux photons. [10]

Afin de comprendre ce phénomène, il faut établir la relation entre la polarisation du milieu et le coefficient α_2 . La polarisation dans le milieu diélectrique s'écrit :

$$\vec{P} = \vec{P}_0 + \epsilon_0 \chi^{(1)} \vec{E} + \epsilon_0 \chi^{(2)} \vec{E} \vec{E} + \epsilon_0 \chi^{(3)} \vec{E} \vec{E} \vec{E} + \dots \quad (5.2)$$

où ϵ_0 est la permittivité du vide (8.85419×10^{-12} C.V⁻¹.m⁻¹) et $\chi^{(1)}, \chi^{(2)}, \chi^{(3)} \dots$ les tenseurs de susceptibilité respectivement linéaire, du deuxième, troisième ... ordre. [7, 9, 10]

Les termes de la susceptibilité d'ordre supérieur sont négligeables sauf si on applique un champ électrique intense de 10^{10} V.m⁻¹. La susceptibilité d'ordre 2 : $\chi^{(2)}$ décrit les effets non linéaires quadratiques tels que la génération de la seconde harmonique et l'effet électro-optique, tandis que $\chi^{(3)}$ correspond aux effets non linéaires cubiques comme l'effet *Kerr* optique et le mélange à quatre ondes. L'absorption à deux photons est un processus dissipatif, mais les susceptibilités des ordres pairs ($\chi^{(2)}, \chi^{(4)}, \dots$) ne contribuent pas à ce processus, sauf s'il y a application d'un champ continu ce qui n'est pas le cas de nos applications. [10]

Le facteur $\chi^{(1)}$ décrit l'absorption linéaire. Si on choisit un matériel transparent à la longueur d'onde de travail, ce coefficient devient nul. Le facteur $\chi^{(2)}$ est nul, car on n'applique pas un champs continu, et les facteurs $\chi^{(n)}$ des ordres supérieurs sont négligeables par rapport au facteur $\chi^{(3)}$. L'équation 5.2 de la polarisation d'une polarisation linéaire devient donc : [10]

$$P = \frac{3}{4}\epsilon_0\chi^{(3)}EE^*E \quad (5.3)$$

Pour plus d'information sur l'obtention de cette équation et en particulier le facteur $\frac{3}{4}$, il faut se reporter à la référence [11].

D'autre part, la puissance Π dissipée dans le matériau s'écrit sous la forme :

$$\Pi = \left\langle \vec{E}(t) \cdot \frac{\partial \vec{P}(t)}{\partial t} \right\rangle \quad (5.4)$$

Comme le champ électrique et la polarisation sont colinéaires, l'équation 5.4 devient :

$$\Pi = -\frac{\omega}{2}\Im m(EP^*) \quad (5.5)$$

La puissance dissipée dans le matériau étant égale à l'atténuation de l'intensité, nous obtenons :

$$\frac{\partial I}{\partial z} = -\frac{\omega}{2}\Im m(EP^*) \quad (5.6)$$

et d'autre part :

$$I = \frac{1}{2}\epsilon_0cnEE^* \quad (5.7)$$

avec c la célérité de la lumière et n l'indice de réfraction du milieu.

On peut alors remplacer la polarisation P par l'équation 5.3 et faire apparaître I dans l'équation 5.6 pour obtenir l'expression finale :

$$\frac{\partial I}{\partial z} = -\frac{3\omega\Im m(\chi^{(3)})}{2\epsilon_0c^2n^2}I^2 \quad (5.8)$$

L'équation 5.1 de la variation de l'éclairement I suivant la direction z dans un matériel transparent pour la longueur d'onde de travail devient :

$$\frac{\partial I}{\partial z} = -\alpha_2I^2 \quad (5.9)$$

En comparant les deux équations 5.8 et 5.9, on retrouve de nouveau la dépendance en I^2 caractéristique de l'absorption à deux photons. On peut donc exprimer le coefficient d'ADP sous la forme :

$$\alpha_2 = \frac{3\omega\Im m(\chi^{(3)})}{2\epsilon_0c^2n^2} \quad (5.10)$$

Nous voyons clairement l'apparition du facteur α_2 dans l'équation 5.8 qui montre l'effet non linéaire du matériau, ce qui démontre l'absorption à deux photons. Mettons maintenant à profit ce phénomène dans le cas d'une réaction de photopolymérisation.

5.2 Photopolymérisation par absorption à deux photons

5.2.1 La photopolymérisation

La formation à partir d'un monomère présent dans une formulation contenant des molécules de base de taille réduite d'une longue chaîne est une réaction de polymérisation. Ce passage est habituellement accompagné d'un changement important des propriétés physico-chimiques du milieu (diminution de la solubilité des entités présentes, changement d'état physique...). [12]

Lorsque cette réaction est amorcée par la lumière, on l'appelle photopolymérisation. Les intermédiaires mis en jeu lors de la croissance du polymère peuvent être de type cationique, anionique ou radicalaire [12]. Dans le cadre de ce travail, nous nous limitons à ce dernier cas, c'est-à-dire que nous ne considérons que la photopolymérisation radicalaire en chaîne.

Afin d'obtenir un mélange photopolymérisable, on ajoute à un monomère un amorceur. Ce dernier est une molécule, par absorption d'un photon, le plus souvent dans l'ultra-violet, génère une espèce radicalaire. La réaction de polymérisation radicalaire en chaîne est décrite par la figure 5.2.

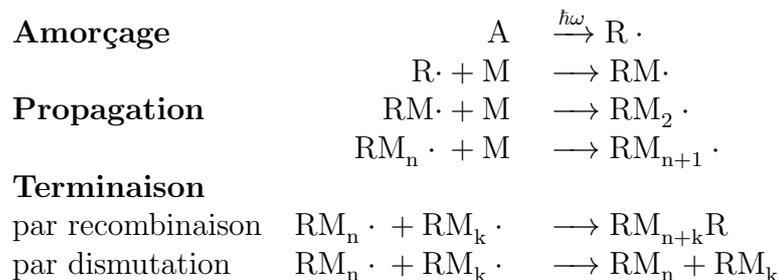


FIGURE 5.2 – Séquence des évènements lors d'une réaction de photopolymérisation radicalaire en chaîne où A représente l'amorceur, $R\cdot$ une espèce radicalaire et M un monomère. [10]

5.2.2 Profondeur de la pénétration de l'ADP

Considérons un faisceau laser focalisé dans un matériau photosensible se propageant dans la direction z . Si l'on ne tient pas compte de l'atténuation du faisceau, la puissance P est constante tout au long de l'axe optique.

Dans le cas d'une absorption à un photon, l'absorption est constante et donnée par $P = \int_{\text{surface éclairé}} I dS$, où dS est la surface éclairée perpendiculaire à la direction de la propagation. En revanche dans le cas de l'absorption à deux photons, la réponse du matériau est proportionnelle à I^2 . Comme l'absorption à deux photons a lieu là où l'éclairement dépasse un certain seuil et que la réponse du matériau est liée directement au facteur quadratique de l'éclairement, cet éclairement doit être très élevé. Par exemple, la figure 5.3 montre l'irradiation d'une solution contenant du fluorène ($C_{13}H_{10}$) qui est un composé qui, sous irradiation ultra-violette, émet une lumière fluorescente violette. Nous remarquons sur la figure 5.3 l'absorption à un photon à 380 nm, là où la fluorescence a lieu sur tout le trajet du faisceau dans la cellule. En revanche à 760 nm, la fluorescence est localisée dans le plan focal de l'objectif de microscope, là où l'éclairement dépasse le seuil nécessaire à l'apparition d'une absorption à deux photons.

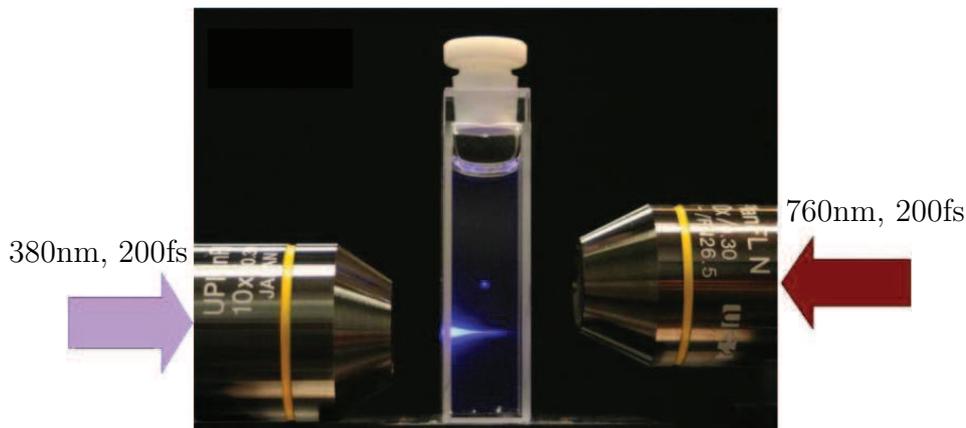


FIGURE 5.3 – La lumière provient d'un laser accordable cohérent Mira 900 Ti : Saphire émettant à 760 nm, pour une durée d'impulsion de 200fs, un taux de répétition de 76 MHz. Le faisceau initial est divisé en deux faisceaux. Un générateur de seconde harmonique a été utilisé pour doubler la fréquence afin d'obtenir le faisceau 380nm, mis en jeu comme source d'excitation à un photon. [13]

L'utilisation d'une photorésine est bien adaptée à une photoinscription à deux photons, à condition qu'elle soit transparente à la longueur d'onde de travail et que l'énergie des photons absorbés soit la moitié de celle nécessaire pour créer les espèces transitoires capable d'amorcer la photopolymérisation. Si le matériaux est transparent à la longueur d'onde de travail et en choisissant bien la puissance du faisceau incident, la polymérisation peut n'avoir lieu qu'au plan de focalisation, c'est à dire là où la puissance lumineuse est suffisante pour induire la photopolymérisation par absorption à deux photons. La polymérisation par ADP est très localisée et donc particulièrement bien

adaptée à la fabrication de micro- ou nano-structures 3D.

5.2.3 La résolution spatiale

Le profil en intensité du faisceau incident dans une photorésine est assimilé à une gaussienne de largeur l . Dans le cas d'une absorption biphotonique, l'énergie absorbée au point focal est proportionnelle à I^2 et a un profil gaussien plus étroit de largeur $l/\sqrt{2}$. Ce rétrécissement n'a pas lieu lorsqu'il s'agit d'une absorption monophotonique. Ce profil gaussien étroit donne une résolution latérale meilleure que l'absorption à un photon et peut dépasser la limite de diffraction. Les valeurs de la résolution obtenues expérimentalement sont indiquées dans la section 5.2.5.

5.2.4 Exemple d'un phototraceur à 2PP

Le système de photoinscription par polymérisation à deux photons est proche de celui d'écriture directe par faisceau laser (section 1.3.1 page 20). Le système est principalement constitué d'une source laser à impulsion ultra-courte, majoritairement des lasers Ti : Saphire ou des laser Nd-YAG, d'un modulateur de lumière, d'un objectif de microscope et de platines de translation tridimensionnelles XYZ .

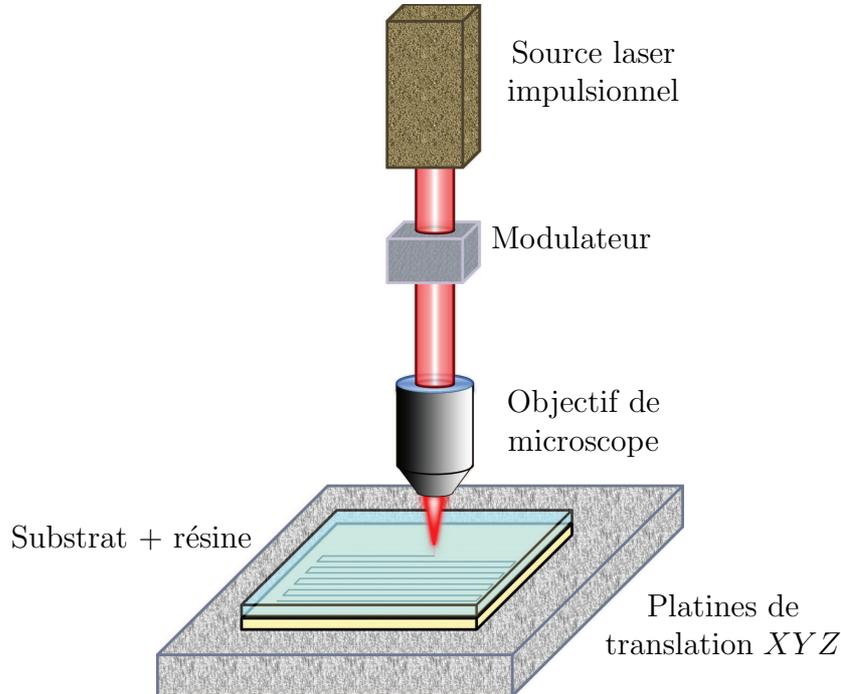


FIGURE 5.4 – Principe d'un système de photoinscription par polymérisation à deux photons.

5.2.5 État de l'art

La photopolymérisation par ADP est utilisée par les scientifiques depuis le début des années 90. Par exemple, Wu *et al.* [14] ont excité à deux photons des résines habituellement utilisées en microélectronique à l'aide d'un laser à impulsions femtosecondes émettant à 620 nm.

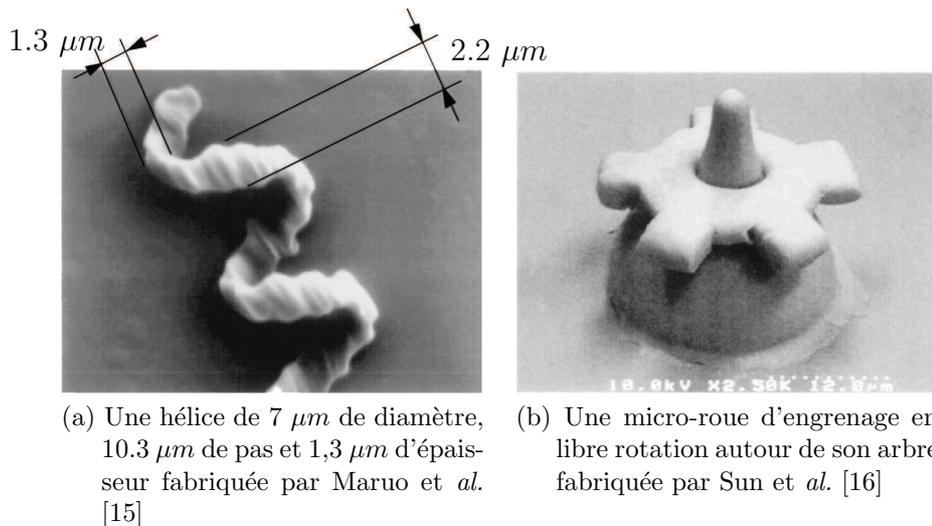


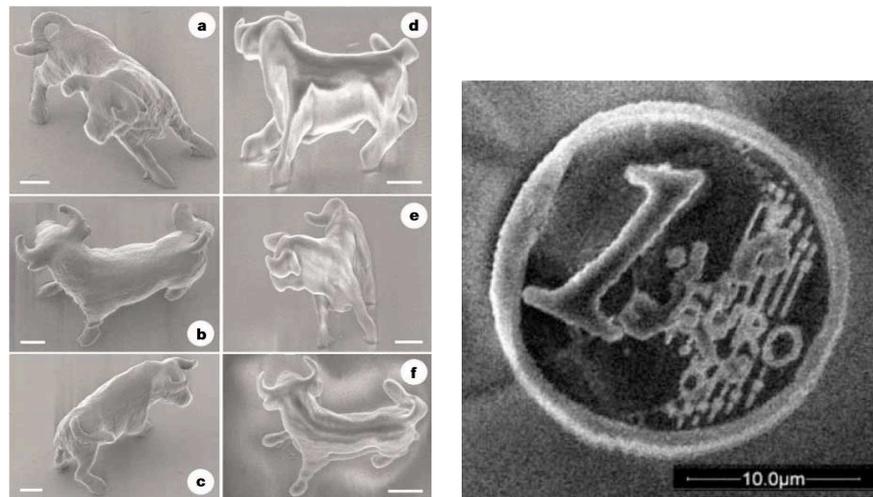
FIGURE 5.5 – Micro structures fabriquées par absorption à deux photons.

En 1997, Maruo *et al.* [15] ont conçu une structure tridimensionnelle par cette technique. Ils ont fabriqué une hélice de 7 µm de diamètre, 10.3 µm de pas et 1,3 µm d'épaisseur avec un laser Ti : Sapphire émettant à $\lambda = 790$ nm, pour une durée d'impulsion de 200 fs, à une fréquence de 76 MHz et une puissance crête de 50 kW (voir figure 5.5a).

En 2000, Sun *et al.* [16] ont fait une micro-roue d'engrenage en libre rotation autour de son arbre à l'aide d'un laser impulsif focalisé à une longueur d'onde $\lambda = 400$ nm, avec des impulsions de 150 fs (voir figure 5.5b).

L'année suivante, Kawata *et al.* [17] ont créé le plus petit animal jamais fabriqué, un micro-taureau très médiatisé ayant pour dimensions 10 µm de long et 7 µm de haut, soit la taille d'un globule rouge. Il a été fabriqué grâce à un laser Ti : sapphire focalisé émettant à 780 nm, avec une résolution de 120 nm (voir figure 5.6a).

En 2005, Lemerrier *et al.* [18] ont utilisé un laser Nd-YAG doublé de chez Nanolase microlaser - JDS Uniphase émettant à une longueur d'onde $\lambda = 532$ nm, pour une durée d'impulsion de 0,5 ns, une puissance crête de 4 µJ et une fréquence de travail de 6,5 kHz pour fabriquer une pièce de monnaie de 1 euro ayant un diamètre de 20 µm, pour une résolution de 200 nm. (voir figure 5.6b).



(a) Kawata et *al.* [17] ont créé un micro-taureau ayant pour dimensions $10 \mu\text{m}$ de long et $7 \mu\text{m}$ de haut.

(b) Une pièce de monnaie de 1 euro fabriquée par Lemerrier et *al.* [18]

FIGURE 5.6 – Micro structures fabriquées par photopolymérisation par absorption à deux photons.

La course à la miniaturisation dans ce domaine continue activement,. De nombreux exemples sur la photopolymérisation par faisceau laser focalisé sont reportés dans les références [17, 19–22].

5.3 Photopolymérisation parallèle à deux photons

La technique de photopolymérisation par ADP est une technique d'écriture directe par faisceau laser. Elle ne nécessite pas l'utilisation d'un photomasque, mais, contrairement à une photoinscription classique à un photon, sa résolution peut dépasser la limite de diffraction grâce à un effet non-linéaire dépendant du carré de l'intensité lumineuse incidente.

La fabrication des composants par photopolymérisation à deux photons se fait en balayant le substrat sous un faisceau laser impulsif focalisé. De plus, la photopolymérisation du matériau photosensible nécessite habituellement plusieurs impulsions, surtout si le système délivre une faible énergie totale à chaque impulsion. Ces deux contraintes entraînent la diminution de la surface tracée par minute et rend donc cette technique surtout adaptée à la fabrication de petites pièces, de petites séries et le prototypage.

Comme indiqué au chapitre 1, la technique de phototraçage par masquage

convient à la production de masse, alors que l'écriture directe est adaptée à la fabrication des petites séries et le prototypage. Le phototraçage parallèle détaillé dans les chapitres 3 et 4, basé sur la photolithographie classique avec un masque reconfigurable, combine l'avantage de la rapidité de la fabrication et la reconfigurabilité.

Dans cette section, nous proposons une nouvelle technique de phototraçage par photopolymérisation à deux photons massivement parallèle qui combine les avantages des deux techniques : rapidité de traçage et fabrication de composants tri-dimensionnels, ayant une résolution dépassant la limite de diffraction.

5.3.1 L'apparition du 2PP parallèle

En 2008, Takahashi et *al* [23] ont mis en place une expérience de photopolymérisation à deux photons parallèle par hologramme. La chaîne laser femtoseconde était constituée d'un oscillateur à laser Ti :Saphir synchronisé (Spectra Physics, Tsunami) utilisant un laser de pompe en régime continu (Spectra Physics, Millennia) et un amplificateur régénératif à impulsions ultra-courtes (Spitfire, Spectra Physics) pompé par un laser Nd :YLF fonctionnant en mode impulsif déclenché (Spectra Physics, Merlin). Ce laser de longueur d'onde $\lambda_p = 800$ nm et de pulsation ~ 150 fs illumine un hologramme synthétisé par ordinateur affiché sur le SLM (Hamamatsu Photonics, PPM). La transformée de *Fourier* de cet hologramme est projetée sur le substrat par une optique de facteur de réduction $\times 50$ avec une ouverture numérique 1,25. (voir figure 5.7).

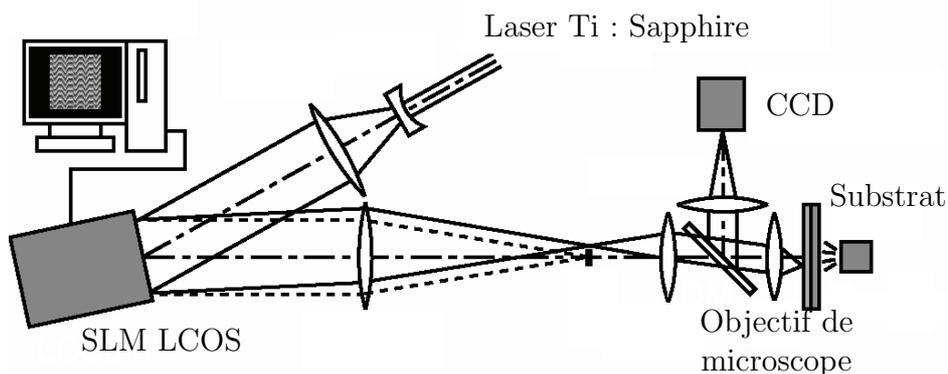
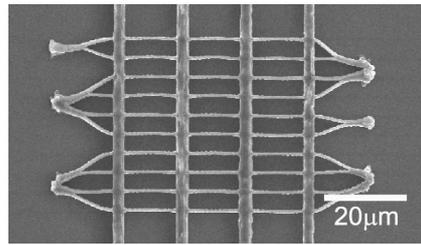


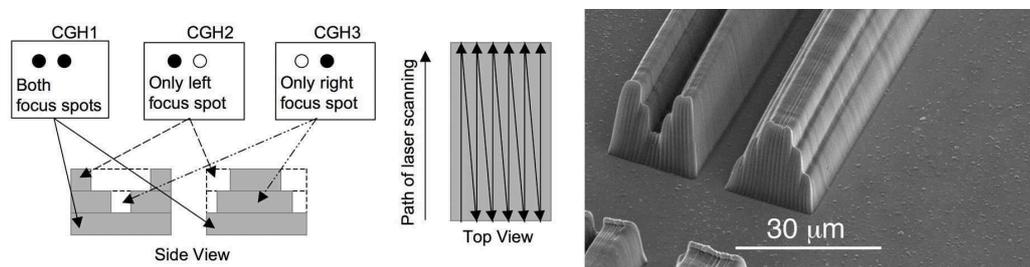
FIGURE 5.7 – Schéma de l'expérience mis en place par Takahashi et *al* [23].

La résolution des composants fabriquée par Takahashi et *al* [23] est de 342 nm (figure 5.8). L'inconvénient de cette technique est qu'il faut faire le calcul de transformée de *Fourier* de toutes les images avant de commencer l'insolation, ce qui demande beaucoup de temps afin d'avoir une image insolée avec un minimum d'erreur.

FIGURE 5.8 – L'insolation obtenu par Takahashi et *al* [23]

En 2009, Bautista et *al.* [24] ont utilisé un SLM Hamamatsu-Photonics X8267-13 en réflexion de 800×600 pixels afin d'appliquer la polymérisation à deux photons parallèle. Un laser Ti :Sapphire de longueur d'onde $\lambda = 780$ nm illumine le SLM. Sa transformée de *Fourier* est projetée sur le substrat avec un objectif de microscope de facteur de réduction $\times 50$ et d'ouverture numérique 0.50. Ils ont utilisé uniquement des hologrammes qui génèrent dans le plan de *Fourier* des vortex optiques, dont le plus petit a une dimension de $10 \mu\text{m}$.

En 2010, Obata et *al.* [25] ont travaillé aussi sur la photopolymérisation à deux photons. Ils ont utilisé un laser femtoseconde Chameleon Ultra II, Coherent GmbH, de fréquence 80 MHz, de longueur d'onde $\lambda = 780$ nm et de pulsation 140 fs, un SLM Holoeye photonics AG et un objectif de microscope de facteur de réduction $\times 100$ à immersion dans l'huile, avec une ouverture numérique de 1,40. La technique de Obata et *al.* consiste à afficher des hologrammes à la vitesse de rafraîchissement de l'écran 20Hz dont la transformée de *Fourier* est un spot unique ou multi-spot. Cette technique s'apparente à l'utilisation de multiples faisceaux indépendants, d'où le nom de photopolymérisation à deux photons par multi-focus parallèle. Mais, elle reste limitée car elle consiste à balayer le substrat sous plusieurs faisceaux ponctuels, avec un nombre de faisceaux limité qui ne dépasse pas généralement 10. La figure 5.9 montre un composant fabriqué à l'aide de cette technique avec une résolution de $0,9 \mu\text{m}$.

FIGURE 5.9 – La technique de multi-focus par Obata et *al.* [25]

Dans une approche similaire, mais appliquée à une autre technique qui est l'ablation laser en régime non-linéaire, Sanner et *al.* [26] ont utilisé un

modulateur spatial de lumière de phase pour donner des formes géométriques au faisceau laser. Ils ont illuminé le SLM par un laser Ti :Sapphire de longueur d'onde $\lambda = 800$ nm, avec une impulsion de durée 130 fs à une cadence de 100 kHz et de puissance moyenne $4 \mu\text{J}$. Un objectif de microscope $\times 8$ d'ouverture numérique 0.25 projette la transformée de *Fourier* de l'image affichée sur le substrat qui peut être un métal, un semi-conducteur, un substrat diélectrique ou un tissu biologique. La figure 5.10 montre que Sanner a gravé différentes formes : disque, anneau, carré et triangle sur de l'acier inoxydable avec une résolution de $20 \mu\text{m}$.



(a) Image des faisceaux lasers modulés à l'aide d'une camera CCD lors de la gravure



(b) Image du composant en acier inoxydable où Sanner a gravé avec 5×10^5 impulsions de puissance $200 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ à $\lambda = 800$ nm

FIGURE 5.10 – Les différentes formes des faisceaux réalisés par Sanner et *al.* [26]

5.3.2 Premier essai par *Télécom Bretagne*

Mélanie Kessels [27], pendant ses travaux de thèse (2004 - 2007) au département d'optique, a abordé le sujet de photopolymérisation parallèle à deux photons par quelques premiers essais expérimentaux. Elle a introduit un modulateur spatial de lumière, un DMD de chez *Texas Instruments*, dans un système de phototraçage ADP (voir figure 5.11b). Avant de procéder aux expériences par photopolymérisation à deux photons qui ont eu lieu pendant le projet européen *NewTon* en collaboration avec LZH¹ à Hannovre - Allemagne,

1. LZH : Laser Zentrum Hannover

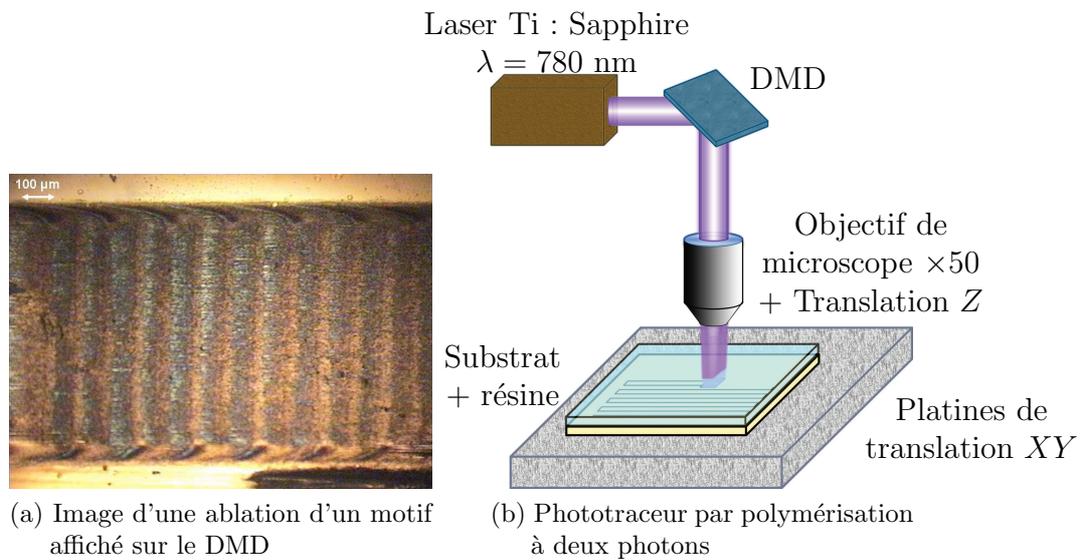


FIGURE 5.11 – Essai de polymérisation à deux photons par un DMD effectué par Mélanie Kessels [27].

ils ont effectué des tests préalables d'ablation du matériau. L'utilité de l'ablation est de vérifier si le DMD module l'amplitude du faisceau lumineux. Dans ces premiers tests, l'image affichée sur le DMD était un damier. La figure 5.11a montre bien une modulation du faisceau, mais le résultat de l'ablation sur la fine couche d'or n'est pas une image 2D, mais un réseau 1D. Ce problème encore imparfaitement compris rencontré semble avoir pour cause la rampe de phase introduite par l'illumination oblique du DMD. Pour plus de détails, voir la thèse de Mélanie Kessels [27] de la page 148 à la page 156.

5.3.3 Démonstration de faisabilité

Toutes les applications citées ci-dessous, en dehors des les travaux de Mélanie Kessels, montrent que la photopolymérisation à deux photons parallèle est une technique de microstructuration de la matière par la lumière, mais le plan du substrat est toujours dans le plan de transformée de *Fourier* du SLM. Dans chaque cas, il faut toujours calculer les hologrammes correspondant avant de commencer l'insolation. Le calcul de ces hologrammes nécessite du temps si on désire obtenir des hologrammes avec un rendement satisfaisant. De plus, le calcul d'un EOD produit toujours une image diffractée imparfaite comportant du bruit et des faisceaux parasites. Ce bruit et ces faisceaux parasites se retrouvent également dans le faisceau de photoinscription. Le nombre de faisceaux obtenus est généralement faible (inférieur à 10) et il n'est pas toujours possible de moduler les faisceaux indépendamment les uns des autres. Enfin, ces techniques ne génèrent habituellement pas plus que 10 spots avec des

SLM dépassant un million de pixels, ce qui signifie une utilisation inefficace du nombre de pixels disponibles sur le SLM.

Pendant les travaux de ma thèse et toujours en collaboration avec LZH, nous avons décidé de poursuivre ceux commencés par Kessels. Mais en revanche, nous avons imaginé un SLM à base de cristaux liquides nématiques en mode de transmission, donc par illumination perpendiculaire au plan du SLM, éliminant ainsi le problème de rampe de phase rencontré par Kessels.

Mise en place

La figure 5.12 montre cette nouvelle expérience mise en place dans les laboratoires de LZH à Hannovre en Allemagne. Un laser Ti : Saphire femto-seconde de longueur d'onde $\lambda = 780$ nm, de fréquence 80 MHz et de pulsation 80 fs, illumine un SLM de chez CRL Opto de définition 640×480 pixels avec un pas de $42 \mu\text{m}$. Nous avons utilisé cet ancien SLM pour contourner le problème de la forte puissance du laser à impulsions femtoseconde pouvant endommager le SLM. Le faisceau incident traverse le SLM avec une polarisation verticale effectuée par un polariseur linéaire à 0° . Afin de moduler l'amplitude du faisceau, nous avons mis en place un analyseur à 90° à la sortie du SLM. Le faisceau modulé qui contient l'image affichée sur le SLM est projeté sur une couche d'Ormosil déposée sur un substrat en verre à l'aide d'un objectif de microscope.

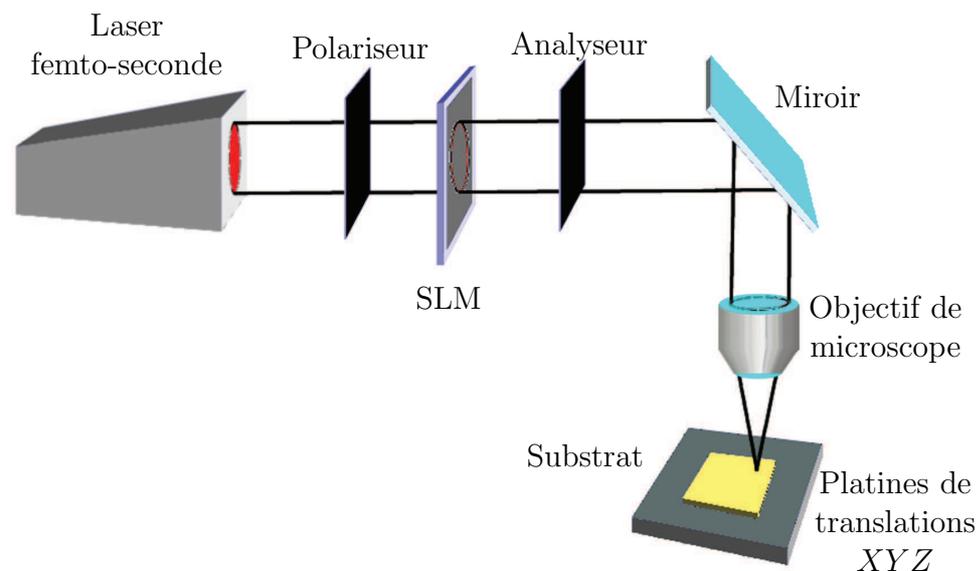


FIGURE 5.12 – Schéma de l'expérience de polymérisation à deux photons parallèle mise en place dans les laboratoires de LZH.

Résultats

Nous avons affiché sur le SLM un réseau binaire vertical ayant un pas de 80 pixels, le SLM se connectant à l'ordinateur à travers le port VGA et l'affichage sur cet écran étant effectué à l'aide de la librairie SDL sous le langage C++. L'image du SLM est focalisée sur la couche d'Ormosil déposée sur un substrat en verre, sachant que cette photorésine est contenue entre deux plaques de verre. La figure 5.13 montre qu'après irradiation la polymérisation d'Ormosil a lieu. En particulier, il y a l'apparition de réseaux binaires, vertical et horizontal, correspondant aux différentes images affichées sur le SLM. Nous remarquons également qu'il existe une polymérisation parasite qui suit une forme gaussienne (forte au centre et faible sur les bords), due à la non uniformité du faisceau qui illumine le SLM.

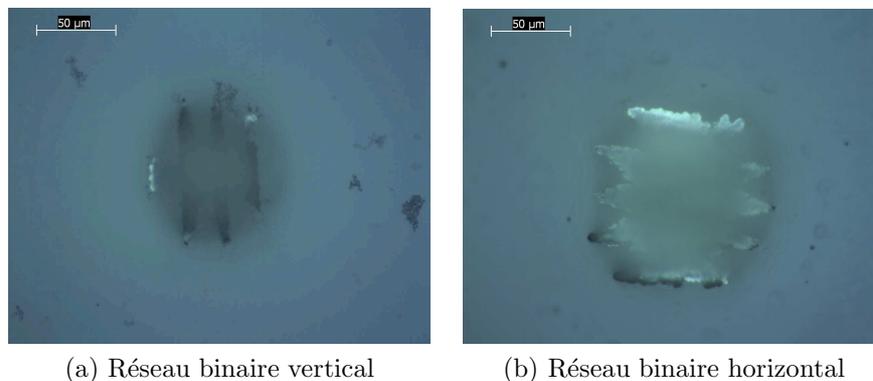


FIGURE 5.13 – Photo prise à l'aide d'un microscope de l'insolation de deux réseaux binaires, vertical et horizontal, créés par photopolymérisation à deux photons parallèle.

Afin de résoudre cette polymérisation indésirable et de pouvoir fabriquer des structures en 3D, il faudrait à l'avenir illuminer le SLM par un faisceau plus uniforme. Il faudrait également utiliser un objectif de microscope qui défocalise rapidement la lumière hors du plan de focalisation afin d'éviter d'avoir des intensités lumineuses supérieures au seuil de polymérisation hors du plan focal.

Conclusion

Nous avons démontré avec l'équipe de LZH que la polymérisation à deux photons parallèle par imagerie d'un SLM à base de cristaux liquides est faisable. Par contre, faute de temps (2 jours d'expériences sur place), nous n'avons pas pu étendre nos essais à d'autres motifs et à d'autres matériaux. Surtout, nous n'avons pas effectué de test de raccordement des images de SLM, afin de réaliser de plus grosses structures (cf. chapitre 3 et 4).

5.3.4 Application du 2PP avec Télécom Saint-Étienne

Nous avons lancé un second projet, *LITHO2PP*, en collaboration avec Télécom Saint-Étienne concernant la photopolymérisation à deux photons parallèle. Il consistait à étendre les expériences faites chez LZH mais avec un laser femtoseconde plus performant, nettement plus puissant et permettant de tirer pleinement avantage des possibilités de l'écriture directe par polymérisation à deux photons. Nous avons également essayé de faire le collage des imagettes du SLM pour fabriquer des structures plus grandes.

Il existe deux types de laser femtoseconde. Le premier concerne des lasers avec une cadence très élevée (quelques dizaines de Mhz) et de faible puissance par impulsion (quelques nJ). Le second correspond aux systèmes amplifiés lasers à faible cadence (quelques kHz) possédant une forte puissance par impulsion (quelques μJ). Le laser utilisé dans les laboratoires de LZH était un laser avec une cadence très élevée de valeur 80 Mhz. Ce type de laser permet la photopolymérisation à deux photons parallèle, mais seulement si le faisceau n'illumine qu'une faible partie du SLM pour ne pas descendre en dessous du seuil de photopolymérisation à deux photons dans le plan de la formulation.

Le laser existant dans les laboratoires de Télécom Saint-Étienne est un laser de faible cadence de valeur 5 kHz avec une puissance très élevée de 7 μJ par impulsion. Ce type de laser est plus adapté à la photopolymérisation à deux photons parallèle car nous pouvons profiter de la totalité du SLM, ce qui signifie un million de faisceaux indépendants.

Mise en place

Nous avons mis en place la même expérience de photopolymérisation à deux photons parallèle qu'à LZH. Le schéma théorique est toujours le même que celui montré sur la figure 5.12. Un Laser Ti :Sapphire de longueur d'onde $\lambda = 780 \text{ nm}$, de fréquence 5 kHz, de pulsation 150fs illumine le SLM CRL Opto (figure 5.14) avec une puissance maximale moyenne de 200 mW. L'image du SLM est projetée sur le substrat à l'aide d'un objectif $\times 20$ (figure 5.15).

Ablation

L'ablation laser est un processus d'enlèvement de matière à la surface d'un solide (ou parfois liquide) par irradiation avec un faisceau laser. À faible flux laser, le matériau est chauffé par l'énergie laser absorbée, puis s'évapore ou se sublime. Aux flux laser élevés, le matériel est généralement converti en un plasma. Habituellement, l'ablation laser consiste à enlever les matériaux avec un laser impulsif, mais il est possible de pratiquer l'ablation d'un matériau avec un faisceau laser d'onde continue, si l'intensité du laser est suffisamment élevée.



FIGURE 5.14 – Expérience mise en place à Saint-Étienne : Photo du laser qui illumine le SLM CRL Opto

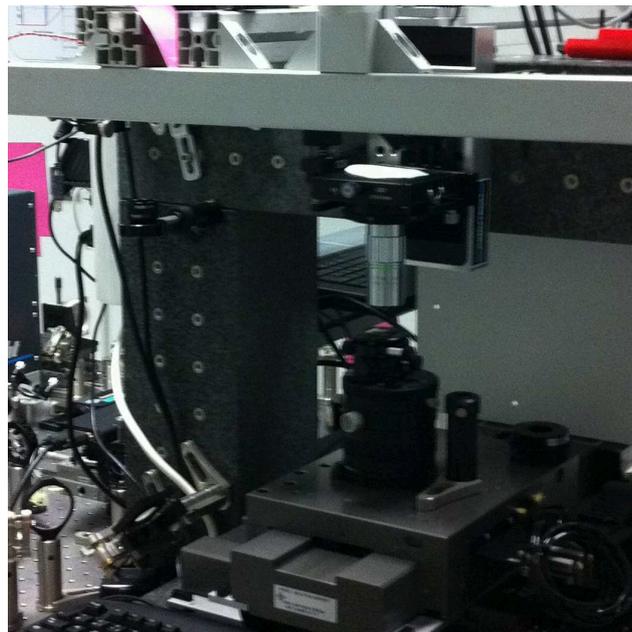


FIGURE 5.15 – Expérience mise en place à Saint-Étienne : Photo de l'objectif de microscope avec les platines de translation XYZ

L'ablation laser nécessite généralement plus d'énergie que la photopolymérisation à deux photons, afin de provoquer le changement d'état de la matière. Comme l'ablation ne nécessite pas d'étape de développement, après irradiation, nous avons décidé de vérifier initialement notre technique par une ex-

périence d'ablation, avant d'aborder la photopolymérisation à deux photons.

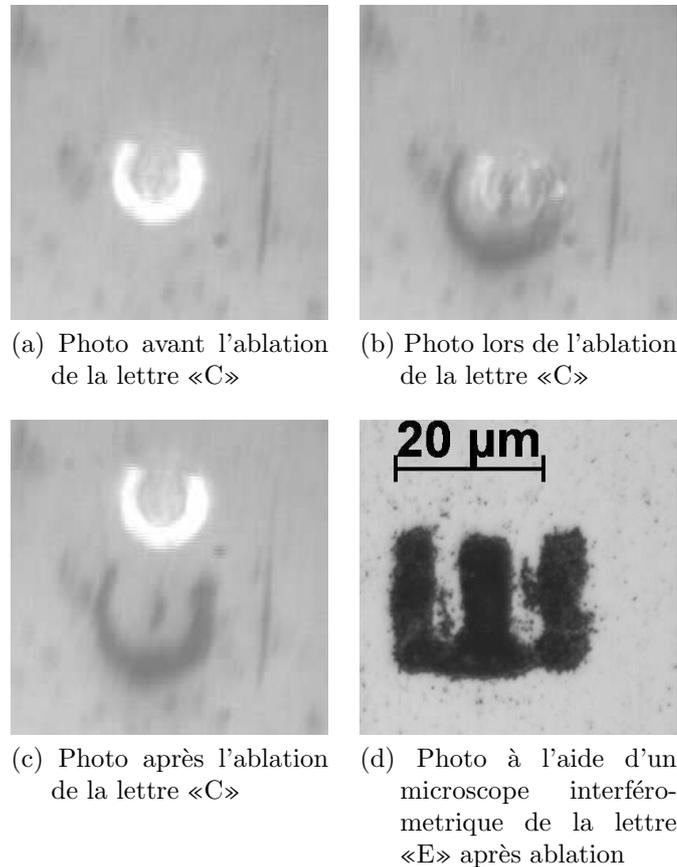


FIGURE 5.16 – Ablation sur inox.

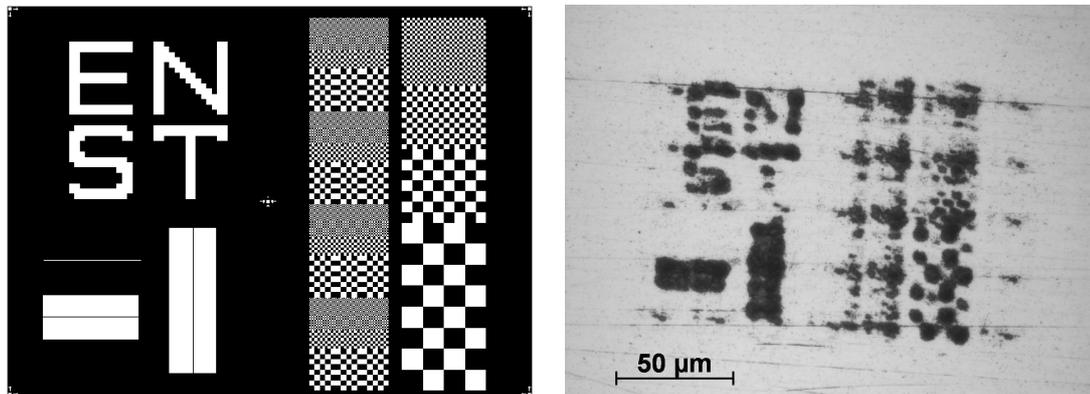
Nous remarquons que, sur la figure 5.16a, il existe un bruit au milieu du faisceau lumineux qui entraîne une ablation indésirable, comme le montre le centre de la lettre «C» de la figure 5.16c. Ce bruit est dû à la non uniformité du faisceau, c'est un faisceau gaussien donc la puissance au centre du faisceau est plus forte.

Nous remarquons également que la barre centrale de la lettre «E» sur la figure 5.16d est plus fortement gravée ce qui est dû à la forte puissance au centre du faisceau.

Nous avons collimaté et agrandi le faisceau laser afin de couvrir 100×100 pixels du SLM. Nous avons affiché sur le SLM des lettres «E» et «C» pour effectuer l'expérience d'ablation sur inox. Nous avons choisi l'inox car son seuil d'ablation est relativement bas par rapport aux autres métaux, afin d'éviter de détériorer le SLM avec les fortes puissances. La figure 5.16a montre la photo de la lettre «C», affichée sur le SLM et projetée sur l'inox, prise à

l'aide d'un CCD juste avant ablation. Une photo prise pendant la procédure d'ablation est montrée dans la figure 5.16b. La figure 5.16c correspond à la lettre «C» gravée dans l'inox, en noir, après ablation et la préparation du tir suivant qui est blanc. À l'aide d'un microscope interférométrique nous avons obtenu la photo 5.16d par ablation de la lettre «E».

Nous avons également expérimenté l'ablation d'images juxtaposées. Pour ceci, j'ai écrit un logiciel qui découpe une image de taille plus grande que le SLM en petites images affichées l'une après l'autre. Le fonctionnement de ce logiciel est identique à celui du phototraceur LCD (section 3.2 page 61). Nous avons découpé l'image test de ENST (figure 5.17a de dimension 640×480 pixels en petites images de 100×100 pixels. L'image de l'ablation de ces images, prise par un microscope interférométrique, est montrée dans la figure 5.17b.



(a) Image test de ENST de 640×480 qui a été découpée en images de 100×100 pixels

(b) Photo prise par un microscope interférométrique de l'ablation des images juxtaposées

FIGURE 5.17 – Ablation des images juxtaposées sur inox

Le résultat obtenu met en évidence des problèmes à régler : surtout la non uniformité du faisceau, la forte énergie, la focalisation. Ces travaux de démonstration de la faisabilité ont été effectués en moins d'une semaine. Les résultats obtenus confirment clairement que cette technique peut fonctionner.

Nous avons aussi effectué une ablation d'une image de la lettre «C» de dimension 200×200 pixels. Cette image a été découpée en 4 images de 100×100 pixels chacune. La figure 5.18a montre la réalisation de l'expérience lors de la gravure de la quatrième image et la figure 5.18b la carte des profondeurs de la gravure obtenue à l'aide d'un microscope interférentiel.

Les résultats de l'ablation dans les figures 5.16 et 5.17 montrent que l'ablation parallèle est faisable à l'aide d'un SLM à cristaux liquide donc nous avons

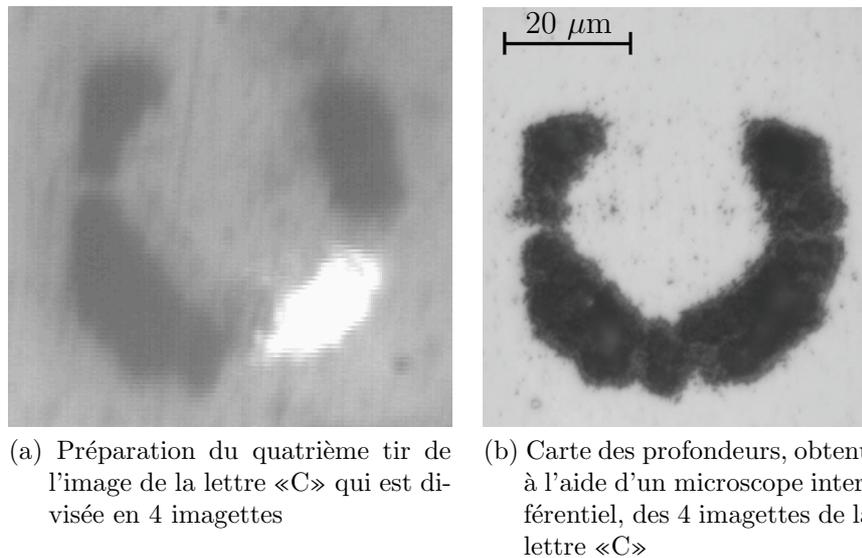


FIGURE 5.18 – Ablation sur inox d'une image de la lettre «C» divisée en 4 imagerie.

procédé à la photopolymérisation à deux photons en utilisant une photorésine *Shibley* et le sol-gel *Ormocomp* de la famille l'*Ormocer*.

Photorésine *Shibley*

Nous avons déposé une couche de photorésine *Shibley S1813* sur un substrat de verre avec une épaisseur de $1 \mu\text{m}$. La photorésine utilisée est transparente à la longueur d'onde $\lambda = 780 \text{ nm}$. Son maximum d'absorption est autour de la longueur d'onde $\lambda = 436 \text{ nm}$, sachant qu'elle absorbe la lumière dans une gamme allant de 350 nm jusqu'à 450 nm . L'énergie absorbée par la photorésine et apportée par deux photons de longueur d'onde $\lambda = 780 \text{ nm}$ est égale à l'énergie d'un seul photon de longueur d'onde $\lambda = 390 \text{ nm}$, ce qui est suffisant pour induire la photomodification de la photorésine *Shibley S1813*.

Nous avons irradié l'échantillon ainsi préparé par le laser Ti : Sapphire à la longueur d'onde $\lambda = 780 \text{ nm}$, en affichant la lettre «C» sur le SLM. La figure 5.19 montre la polymérisation à deux photons de la photorésine.

Ormocomp

L'*Ormocomp* est un matériau sol-gel hybride de la famille des *Ormocer*®. il est, comme la photorésine *Shibley*, transparent à la longueur d'onde $\lambda = 780 \text{ nm}$ et polymérise pour les longueurs d'ondes allant jusqu'à 400 nm . L'*Ormocomp* peut aussi absorber deux photons de longueur d'onde $\lambda = 780 \text{ nm}$, ce qui induit la polymérisation de la formulation.

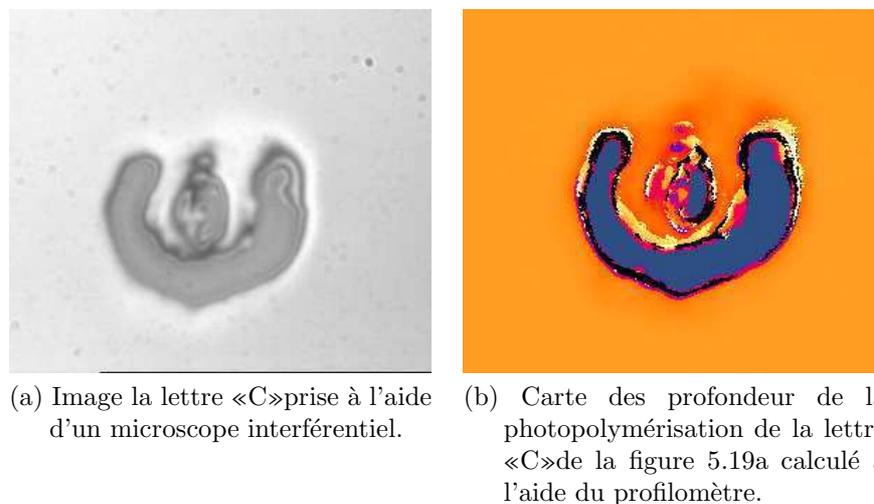


FIGURE 5.19 – Image de photopolymérisation à deux photons de la photorésine *Shipley* sous irradiation laser Ti : Sapphire, avec une puissance moyenne de 50 mW.

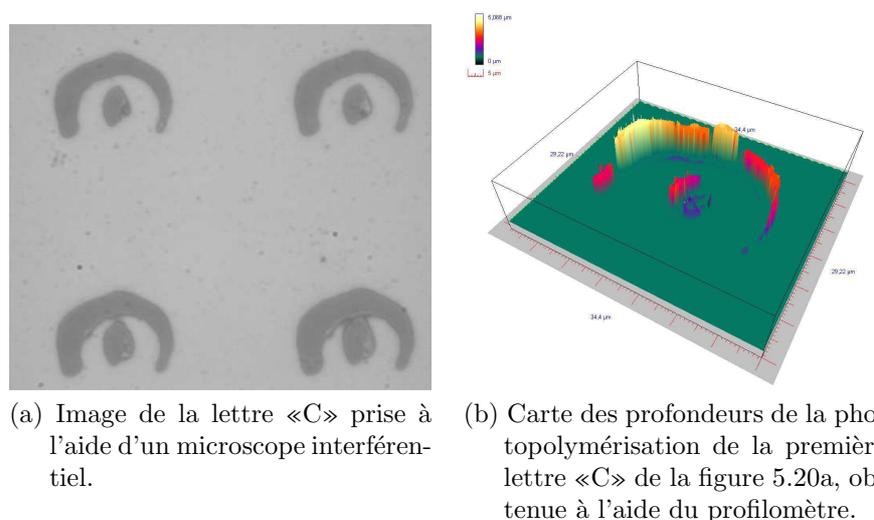


FIGURE 5.20 – Image des structures obtenues par photopolymérisation à deux photons de l'*Ormocomp* sous irradiation laser Ti : Sapphire avec une puissance moyenne de 100 mW.

Nous avons irradié une couche d'*Ormocomp* d'épaisseur $3 \mu\text{m}$ avec des puissances allant de 50 mW à 100 mW, atténuées par une densité optique de 5. Le temps d'exposition des différents motifs variait de 50 ms à 1 s. La figure 5.20 montre la photopolymérisation à deux photons d'un motif irradié par $22,5 \times 10^3$ impulsions de puissance moyenne 140 nJ, qui démontre la

possibilité de l'écriture directe parallèle par deux photons dans le matériau considéré.

Pendant les manipulations de démonstration de faisabilité de la technique de photopolymérisation par ADP, nous avons utilisé des atténuateurs de faisceau et le laser travaillait en dessous de sa puissance maximale. On peut donc en conclure que l'énergie nécessaire pour amorcer la photopolymérisation à deux photons est plus faible que celle produite par le laser. Cette réserve d'énergie pourrait donc être mise à profit pour éclairer une plus grande surface du SLM, afin de profiter de tous les pixels et de réduire le temps d'insolation. L'objectif est ici de pouvoir augmenter très significativement la vitesse de phototraçage.

5.4 Conclusion

Que ce soit par absorption à un photon ou par absorption à deux photons, la photopolymérisation ne s'effectue que si l'éclairement dépasse un seuil. Les seuils de ces deux techniques sont différents. Plus précisément, le seuil de la photopolymérisation à deux photons est largement plus élevé que celui à un photon, ce qui le confine très fortement dans l'espace avec un faisceau focalisé.

Comme la photopolymérisation à deux photons peut être localisée uniquement dans le plan focal de l'objectif de projection, sa mise à profit pour la fabrication de composants 3D a eu un grand succès. La fabrication de composants 3D par la photopolymérisation à deux photons se fait généralement en focalisant un faisceau laser femtosecond dans un matériau photosensible et en déplaçant l'échantillon dans les trois directions XYZ .

Au niveau microscopique, la photopolymérisation par ADP dépend du carré de l'intensité lumineuse absorbée par les atomes. Si le substrat irradié est transparent à la longueur d'onde du travail, il y a seulement la photopolymérisation à deux photons et la résolution des composants fabriqués peut dépasser les limites de diffraction.

Dans le but d'augmenter la rapidité de fabrication de ces structures, quelques laboratoires ont commencé récemment à travailler sur la photopolymérisation à deux photons parallèle en utilisant des SLMs à cristaux liquides nématiques. Leur technique consiste à afficher un hologramme sur le SLM afin d'effectuer une modulation de phase du faisceau. La transformée de *Fourier* de ces hologrammes est projetée sur le substrat pour graver le motif désiré. Cette technique de photopolymérisation parallèle par ADP souffre de la nécessité de calculer les hologrammes synthétisés par ordinateur, ce qui prend un certain temps et ralentit le processus. Un autre désavantage est que la qualité de l'image reconstruite par les hologrammes reste imparfaite, comportant du bruit et des faisceaux parasites. D'autres laboratoires utilisent aussi les SLM pour créer des multifaisceaux, mais le nombre de faisceaux parallèles indé-

pendants reste limité et inférieur à 10, ce qui correspond à une utilisation inefficace du nombre des pixels du SLM.

Au sein du département optique de Télécom Bretagne, nous avons développé une nouvelle technique de photopolymérisation parallèle par ADP. Elle consiste à illuminer un SLM par un laser femto-seconde et projeter son image dans une couche de matériau photosensible. Nous avons démontré la faisabilité de cette technique en photopolymérisant par ADP parallèle la photorésine *Shipley* et l'*Ormocomp* par irradiation laser Ti : Saphire à la longueur d'onde $\lambda = 780$ nm.

Pendant les travaux de ma thèse, nous avons démontré pour la première fois à notre connaissance la faisabilité de la photopolymérisation à deux photons parallèle par imagerie du SLM, mais, à cause de la contrainte de temps, nous n'avons pas pu optimiser les résultats (cf. figures 5.19 et 5.20). Une publication sur ces résultats est en cours de rédaction. Cette technique combine les avantages du phototraçage parallèle, la rapidité et la reconfigurabilité, avec l'avantage de la photopolymérisation à deux photons, c'est à dire la possibilité de dépasser la limite de diffraction. Nous espérons à terme à l'aide de cette technique construire des structures 3D avec une résolution submicronique, plus rapidement qu'avec les autres techniques existantes et avec des tailles plus grandes.

La création par ADP de composants tridimensionnels submicroniques nécessite l'optimisation de plusieurs facteurs dont la focalisation, l'uniformité du faisceau et la puissance du laser. Pour cela, nous montons actuellement un projet dont le but sera d'optimiser et d'industrialiser la technique de photopolymérisation à deux photons parallèle par imagerie du SLM.

Bibliographie

- [1] L. Li, R. R. Gattass, E. Gershgoren, and J. T. Fourkas, "Achieving resolution far beyond the diffraction limit with rapid photolithography," in *Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference*, p. CPDA1, Optical Society of America, 2009.
- [2] J. D. Bhawalkar, G. S. He, and P. N. Prasad, "Nonlinear multiphoton processes in organic and polymeric materials," *Reports on Progress in Physics*, vol. 59, pp. 1041–1070, Sept. 1996.
- [3] B. Reinhardt, "two-photon technology : new materials and evolving applications," *Photon. Sci. News*, vol. 4, p. 21, 1999.
- [4] W. Denk, J. Strickler, and W. Webb, "Two-photon laser scanning fluorescence microscopy," *Science*, vol. 248, pp. 73–76, Apr. 1990.
- [5] D. A. PARTHENOPOULOS and P. M. RENTZEPIS, "Three-Dimensional optical storage memory," *Science*, vol. 245, no. 4920, pp. 843–845, 1989.
- [6] J. H. Strickler and W. W. Webb, "Three-dimensional optical data storage in refractive media by two-photon point excitation," *Opt. Lett.*, vol. 16, pp. 1780–1782, Nov 1991.
- [7] T. BOULESTEIX, *Microscopie non lineaire : chiralite et generation de second harmonique*. PhD thesis, 2004.
- [8] W. Kaiser and C. G. B. Garrett, "Two-Photon excitation in $\text{CaF}_2 : \text{Eu}^{2+}$," *Physical Review Letters*, vol. 7, no. 6, p. 229, 1961.
- [9] S. Klein, *Étude et réalisation de composants optiques intégrés à base de photopolymères fonctionnalisés*. PhD thesis, Université Louis Pasteur – Strasbourg I, Strasbourg, France, 2006.
- [10] C. MARTINEAU, *Polymérisation par absorption à deux photons : ingénierie moléculaire d'amorceurs et applications à la microfabrication à trois dimension*. PhD thesis, École Normale Supérieure de Lyon, Lyon, France, 2003.
- [11] P. N. Butcher and D. Cotter, *The Elements of Nonlinear Optics*. Cambridge University Press, July 1991.
- [12] G. G. Odian, *Principles of polymerization*. John Wiley and Sons, 2004.
- [13] D. Z.-L. Huang, "One vs two-photon excitation," tech. rep., University of Central Florida, 2006. <http://belfield.cos.ucf.edu/one%20vs%20two-photon%20excitation.html>.

-
- [14] E. Wu, "Two-photon lithography for microelectronic application," in *Proceedings of SPIE*, (San Jose, CA, USA), pp. 776–782, 1992.
- [15] S. Maruo, O. Nakamura, and S. Kawata, "Three-dimensional microfabrication with two-photon-absorbed photopolymerization," *Opt. Lett.*, vol. 22, pp. 132–134, Jan 1997.
- [16] H.-B. Sun, T. Kawakami, Y. Xu, J.-Y. Ye, S. Matuso, H. Misawa, M. Miwa, and R. Kaneko, "Real three-dimensional microstructures fabricated by photopolymerization of resins through two-photon absorption," *Opt. Lett.*, vol. 25, pp. 1110–1112, Aug 2000.
- [17] S. Kawata, H.-B. Sun, T. Tanaka, and K. Takada, "Finer features for functional microdevices," *Nature*, vol. 412, pp. 697–698, 08 2001.
- [18] G. Lemerrier, J.-C. Mulatier, C. Martineau, R. AnÈmian, C. Andraud, I. Wang, O. StÈphan, N. Amari, and P. Baldeck, "Two-photon absorption : from optical power limiting to 3d microfabrication," *Comptes Rendus Chimie*, vol. 8, no. 8, pp. 1308 – 1316, 2005. MatÈriaux molÈculaires.
- [19] A. Ostendorf, "Two-Photon polymerization : A new approach to micromachining," *Photonics Spectra*, vol. 40, no. October, p. 72, 2006.
- [20] T. Tanaka, H. Sun, and S. Kawata, "Rapid sub-diffraction-limit laser micro/nanoprocessing in a threshold material system," *Applied Physics Letters*, vol. 80, no. 2, p. 312, 2002.
- [21] H. Sun, K. Takada, and S. Kawata, "Elastic force analysis of functional polymer submicron oscillators," *Applied Physics Letters*, vol. 79, no. 19, p. 3173, 2001.
- [22] P. Galajda and P. Ormos, "Complex micromachines produced and driven by light," *Applied Physics Letters*, vol. 78, no. 2, p. 249, 2001.
- [23] H. Takahashi, S. Hasegawa, A. Takita, and Y. Hayasaki, "Sparse-exposure technique in holographic two-photon polymerization," *Opt. Express*, vol. 16, pp. 16592–16599, Oct 2008.
- [24] G. Bautista, M. J. Romero, G. Tapang, and V. R. Daria, "Parallel two-photon photopolymerization of microgear patterns," *Optics Communications*, vol. 282, no. 18, pp. 3746 – 3750, 2009.
- [25] K. Obata, J. Koch, U. Hinze, and B. N. Chichkov, "Multi-focus two-photon polymerization technique based on individually controlled phase modulation," *Opt. Express*, vol. 18, pp. 17193–17200, Aug 2010.

- [26] N. Sanner, N. Huot, E. Audouard, C. Larat, and J.-P. Huignard, “Direct ultrafast laser micro-structuring of materials using programmable beam shaping,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 45, no. 6, pp. 737 – 741, 2007.

- [27] M. Kessels, *Techniques et dispositifs pour la photoinscription directe massivement parallèle de structures sub-microniques (2D et 3D)*. Thèse de doctorat, Télécom Bretagne, 2007.

Conclusion et perspectives

Cette thèse s'inscrit dans un continuum de recherche et de développement de la photoinscription directe massivement parallèle qui, depuis une dizaine d'années, est poursuivie à Télécom Bretagne. Nous avons étudié, au cours de ce travail doctoral, l'amélioration et l'extension des techniques existantes au département optique et développé une nouvelle technique basée sur l'absorption à deux photons dans le but d'améliorer les performances des éléments optiques diffractants réalisables.

Dans une première partie, nous avons présenté les techniques de photolithographie classique ainsi que celle de l'écriture directe en exposant les principes généraux. La photolithographie par photomasque caractérisée par sa rapidité est généralement utilisée pour la production de masse, tandis que l'écriture directe capable de fabriquer tout type de motif partant d'un schéma conçu par ordinateur, convient particulièrement au prototypage. Au département optique de Télécom Bretagne, un phototraceur massivement parallèle combine la rapidité de la photolithographie par projection de photomasque à la flexibilité de l'écriture directe en remplaçant le réticule usuel par un modulateur spatial de lumière.

La première étape de notre travail était d'améliorer la résolution des éléments optiques diffractants fabriqués par le phototraceur existant. Ce phototraceur comporte un élément clé, un modulateur spatial de lumière à cristaux liquides. Dans l'état des travaux au début de mes recherches, le SLM limitait la résolution de ce phototraceur à $3 \mu\text{m}$. Le changement de ce micro-écran s'est révélé nécessaire pour réduire la résolution de ce phototraceur. Nous avons étudié et caractérisé différents modulateurs spatiaux de lumière afin de choisir le remplaçant. L'intégration du nouveau SLM, fabriqué par la société *Epson* et possédant un connexion numérique, a exigé le remplacement du matériel informatique pilotant le phototraceur, rendant la réécriture du logiciel du pilotage impérative. Nous avons également remis en place la focalisation, le parallélisme des plans du LCD, les platines de translation et le raccord des imagettes.

Les tests réalisés à l'aide de ce nouveau LCD ont aussi révélé la possibi-

lité d'utiliser les niveaux de gris du micro-écran pour la fabrication directe des composants à multiniveaux, ce qui n'était pas possible avec l'écran LCD précédent. Nous avons ainsi développé une nouvelle technique d'inscription d'éléments à multiniveaux de phase à partir d'une table de correspondance. Les éléments optiques diffractants obtenus par cette nouvelle technique sont plus reproductibles et la procédure de fabrication de ces composants est moins complexe car l'image affichée sur le SLM est fixe. De plus, cette technique nous a fourni la possibilité de fabriquer des EODs avec 32 niveaux de phase et parfois plus. Précédemment, il était très difficile de produire plus de 16 niveaux de phase.

La dimension critique des structures fabriquées par photoinscription directe avec ce phototraceur atteint maintenant $1\ \mu\text{m}$ avec une vitesse de traçage de $XX\ \text{cm}^2/\text{min}$. Avec ce phototraceur amélioré nous avons réussi à fabriquer des composants optiques diffractants possédant une efficacité de diffraction à l'ordre 0 (η_0) inférieure à 1% et celle de l'ordre +1 (η_1) aux alentours de 80%. Nous utilisons également une seule table de correspondance pour la fabrication des composants à multiniveaux de phase. Cette même table de correspondance peut être utilisée pour des EOD optimisés pour différentes longueurs d'ondes en changeant uniquement le temps d'exposition. Tous ces avantages obtenus grâce à l'amélioration du SLM rendent la fabrication des EOD plus compatible avec une production de masse.

Le deuxième axe de notre travail visait à poursuivre notre recherche de miniaturisation de la dimension critique des structures fabriquées. Cette fois-ci, en réduisant la longueur d'onde de photoinscription à des valeurs se situant dans l'ultra-violet, nous pouvons réduire la taille des motifs du fait que la dimension critique de fabrication est directement proportionnelle à la longueur d'onde. La réduction de la dimension critique des structures diffractantes permet de fabriquer des EODs avec des plus grands angles de diffraction et travaillant à des longueurs d'onde plus faibles. Une autre avancée obtenue en passant aux longueurs d'onde de photoinscription dans l'ultra-violet est la possibilité de tracer dans de nouveaux matériaux. Pour profiter de ces avantages, nous avons mis en place un deuxième phototraceur fonctionnant avec une lampe flash *Xenon* filtrée autour de 365 nm, qui illumine un modulateur spatial de lumière DMD commercialisé par la société *Texas Instruments*. Ce micro-écran est constitué d'une matrice de micro-miroirs de 1024×768 pixels car les micro-écrans LCD sont endommagés par une illumination ultra-violette. L'image générée par ce SLM est projetée sur le matériau photosensible par un objectif de microscope de facteur de réduction $\times 20$ et une profondeur de champ $2\ \mu\text{m}$ afin d'obtenir une dimension de motif minimale d'environ 700 nm. Nous avons également introduit dans notre nouveau système des platines de translation de chez *Physik Instrumente* possédant une résolution de 80 nm afin qu'elle soit compatible avec notre résolution de fabrication. Ces platines

de translation couvrent une surface de $10 \times 10 \text{ cm}^2$. La focalisation de l'image du SLM sur une telle surface avec un objectif de profondeur de champ $2 \mu\text{m}$ exige l'installation d'un système de mise au point automatique. La réalisation de ce système a été effectuée par une boucle d'asservissement dont les composants principaux sont un laser rouge, un PSD, et un piézoélectrique.

À notre connaissance, les performances de ce nouveau phototraceur à micro-miroirs dépassent celles obtenues et publiées par les laboratoires de recherche concurrents utilisant cette technique de phototraçage parallèle avec des matériaux commerciaux. Certaines entreprises atteignent des résolutions plus élevées, mais généralement au prix de matériel au coût inabordable pour des laboratoires. De plus, avec une longueur d'onde de travail de 365 nm , nous pouvons désormais élargir l'écriture directe à d'autres matériaux photosensibles, tels que le matériau sol-gel hybride *Ormocer*®. Ainsi, en filtrant la lampe flash à une autre longueur d'onde, 320 nm , on envisage de fabriquer des guides d'ondes fonctionnels dans le PVCi, polymère dont l'indice de réfraction diminue aux longueurs d'ondes télécoms ($1,3$ et $1,55 \mu\text{m}$) sous irradiation UV.

Le savoir-faire acquis au département optique et les performances atteintes par ces phototraceurs ont donné naissance à l'entreprise *HOLOTETRIX*. Les avancées obtenues au cours de ma thèse ont déjà été transférées à *HOLOTETRIX* dans le cadre d'un accord de transfert de technologie. Ces avancées ainsi que les résultats présentés dans ce manuscrit ont permis d'améliorer et étendre l'offre technologique et commerciale de *HOLOTETRIX* en utilisant le phototraceur LCD. Celle-ci comble un créneau, peu couvert par les équipements sur le marché, qui concerne le prototypage de structures binaires et à multiniveaux de phase, de dimension critique autour de $1 \mu\text{m}$.

Les EOD fabriqués par ces phototraceurs sont arrivés maintenant aux limites de la théorie scalaire paraxiale de la diffraction utilisée jusqu'ici au département optique pour la conception des EODs. C'est dans cette perspective que le département optique vient de proposer un sujet de thèse dont le but est d'optimiser le calcul des EODs en utilisant des modèles plus précis et plus complexes de la diffraction.

Les deux phototraceurs que nous avons mis en place atteignent en pratique la limite de ce qui est possible avec cette approche : la limite de diffraction. Pour réduire la dimension critique des motifs fabriqués en gardant toujours la même méthodologie, il faut réduire la longueur d'onde en passant à l'ultra violet lointain, mais à cette plage de longueurs d'ondes le matériel optique devient très onéreux, et le prix des SLM devient inabordable car ces SLM doivent être fabriqués sur mesure. Dans le but d'améliorer la résolution des composants, nous avons poursuivi les recherches et établi de nouvelles collaborations pour

mettre en place une nouvelle technique de rupture.

Cette nouvelle approche technologique, consistant à combiner la photopolymérisation à deux photons avec le phototraçage parallèle, a été démontrée en collaboration avec les laboratoires de *Laser Zentrum Hannover* (LZH) en Allemagne dans le cadre du projet européen NewTon et poursuivi dans les laboratoires de *Télécom Saint-Étienne* en France dans le cadre du projet Litho2PP. Pendant mon séjour à LZH, nous avons démontré la faisabilité de la photopolymérisation à deux photons parallèle en intégrant dans leur système un modulateur spatial de lumière LCD. Suite aux premiers tests de réalisation dans le matériaux Ormocil®, nous avons poursuivi l'étude de cette technique pendant un séjour à Saint-Étienne en utilisant un autre laser à impulsion plus performant afin de réaliser de nouveaux composants dans d'autres matériaux dont la photorésine et l'Ormocomp. Lors de cette courte expérience, nous avons également pu graver des surfaces plus grandes que la taille d'un seul SLM avec notre technique de juxtaposition d'images du SLM.

La photopolymérisation à deux photons massivement parallèle ouvre de nouvelles perspectives dans la recherche de la miniaturisation des structures fabriquées, en particulier liée à sa capacité à dépasser la limite de diffraction et de fabriquer des vraies structures 3D, comportant des vides, de plus grande taille et plus rapidement que les techniques actuelles. À terme, cette technique donnera la possibilité d'utiliser des effets de volume, de type *Bragg*, par exemple pour augmenter significativement les efficacités de diffraction des EODs réalisés. Ce sujet très prometteur devrait être poursuivi dans le cadre d'un projet de recherche en cours d'élaboration, actuellement, au sein du département optique de *Télécom Bretagne*.

Appendices

Annexe A

Article

Direct write of optical diffractive elements and planar waveguides with a digital micromirror device based UV photoplotter



Direct write of optical diffractive elements and planar waveguides with a digital micromirror device based UV photoplotter

M.V. Kessels^{a,*}, C. Nassour^a, P. Grosso^b, K. Heggarty^a

^a Télécom Bretagne, Technopôle Brest-Iroise, CS 83818, 29238 Brest Cedex 3, France

^b Centre Commun Lannionnais d'Optique (CCLO) UMR CNRS 6082 Foton, ENSSAT, 6 rue de Kérampont, BP 80518, 22305 Lannion Cedex, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 14 January 2010

Received in revised form 23 March 2010

Accepted 25 March 2010

Keywords:

Optical lithography

Maskless patterning

Photopolymers

Digital micromirror device

Computer generated hologram

Long period grating

ABSTRACT

A photoplotter, based on a digital micromirror device as real-time reconfigurable mask, is designed to direct-write microstructures in different photosensitive materials. Binary and multilevel elements, such as computer generated holograms with 2, 4 and 8 phase levels and planar optical waveguide structures with tapers and/or long period gratings, are fabricated in a single processing step. Direct parallel write into different photosensitive materials with attractive optical properties is proposed and first results are shown in a commercially available organic-inorganic hybrid material.

© 2010 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

In recent years, optical maskless lithography (OML) has become more and more important in both industry and research, because mask cost and cycle time have increased dramatically as designs become more complex and the mask specifications tighter [1,2]. The major advantages of OML are the removal of the need to replace masks, the simplified process operation, overlay accuracy improvement, production cycle shortening and often a considerable decrease in production cost, especially for prototype production [3,4]. Furthermore, compared to single beam direct-write methods, the area-write techniques have the advantage of simultaneously direct writing binary and multilevel elements over large areas of the substrate, thanks to the use of up to millions of modulated beams [5–8].

A versatile photoplotter built around a liquid crystal display (LCD) was previously described by Kessels et al. [9]. It constitutes a flexible system for the direct writing of microstructures with minimum feature sizes in the 2–3 μm range that is well adapted to the manufacture of computer generated holograms (CGHs) in the visible and infrared spectra. However, for some specific CGHs and other components, such as planar optical waveguides, a submicronic

resolution is necessary. As a first step towards improving resolution, optical proximity correction (OPC) techniques, specifically adapted to this prototype, were developed to improve the fidelity of the written structures [10]. To further enhance the structure resolution, and also to extend the parallel direct-write technique to other photosensitive materials with attractive optical properties, a new photoplotter is presented in this paper. This new machine, based on a similar principle and software, works with a stronger reduction factor lens and the LCD screen is replaced by a digital micromirror device (DMD), developed by Texas Instruments Inc. (TI), to enable a lower wavelength ultra-violet (UV) source to be used. The use of LCDs is problematic in the UV, because the liquid crystal (LC) molecules can be damaged by high optical powers at such wavelengths. Thanks to the DMD properties [11,12], lower wavelength UV sources can be used to obtain microstructures with smaller critical dimension (CD). In this work, we experimentally demonstrate the ability to write, in a single step process, complex 3D structures, such as CGHs with 2, 4, 8 phase levels and planar optical waveguide structures with tapers or long period gratings (LPGs). We also present preliminary experiments with two photopolymers, ORMOCER and Poly(vinyl cinnamate) (PVCi), in which it is possible to directly write functional components for integrated optical systems by polymerization [13–17].

2. Photoplotter design

To improve fabricated structure CD, the new photoplotter was designed around a DMD microdisplay which is able to work across a wider wavelength range than the LCD screen: from the ultra-violet

* Corresponding author. Tel.: +33 2290 01205; fax: +33 2290 01025.

E-mail addresses: Melanie.Kessels@telecom-bretagne.eu (M.V. Kessels), Charbel.Nassour@telecom-bretagne.eu (C. Nassour), Philippe.Grosso@enssat.fr (P. Grosso), Kevin.Heggarty@telecom-bretagne.eu (K. Heggarty).

¹ M. V. Kessels is now at Delft University of Technology, Lorentzweg 1, 2628 CJ Delft, The Netherlands.

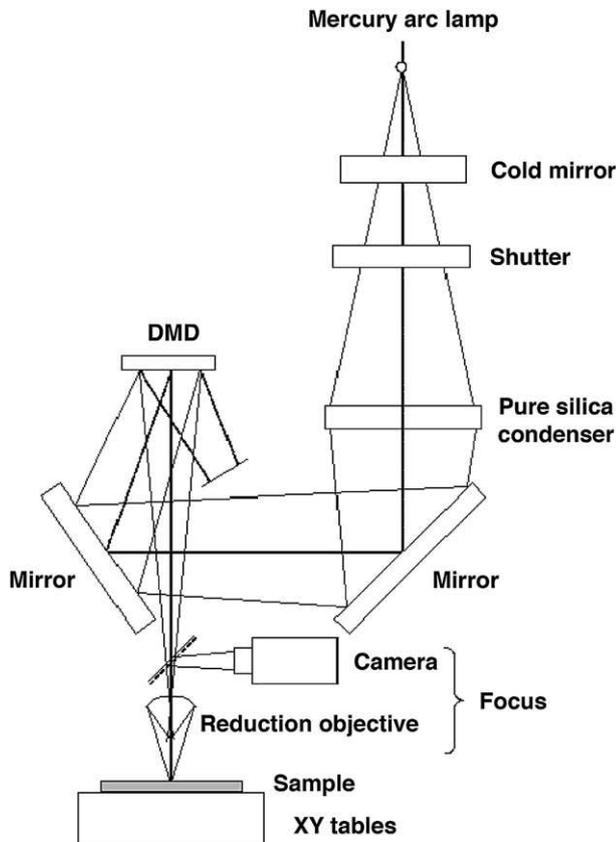


Fig. 1. Principle of the new photoplatter using a DMD as reconfigurable mask.

(UV) to near-infrared (NIR). Since the DMD is reflective, the overall system design had to be modified, even if its operation (Fig. 1) remains essentially the same as for the previous photoplatter. A light

source illuminates the reflective spatial light modulator (SLM) made of an array of hundreds of thousands of micromirrors, individually addressable and tiltable along their diagonal [3,12]. The pattern displayed on the DMD is imaged onto a photoresist-coated substrate with a reduction lens. The components, advantages and features of the new prototype are described in detail in the next section.

2.1. Digital micromirror device

The reflective micromirror device from TI has characteristics of both a micro-electronic mechanical system (MEMS) and an SLM [3,18]. The 0.7 XGA DMD of our system, optimised for standard visible spectrum, consists of 1024×768 square micromirrors on a pixel pitch of $13.68 \times 13.68 \mu\text{m}^2$. Each micromirror tilts along its diagonal by an angle of $\pm 12^\circ$ [12]. The DMD optical fill factor is 85%, which is a significant improvement on the LCD screen. Device control is through a USB connection that supports binary frame rates of up to 100 Hz which means that SLM refresh rate no longer limits the maximum possible plot rate as it was sometimes the case with the LCD prototype [9].

Correct DMD illumination is an important aspect of the optical setup. Due to the micromirror tilt angle, the incident beam has to illuminate the DMD microdisplay at a specific angle in a particular plane to obtain a reflected, modulated light beam in the orthogonal direction to the plane of the DMD, as shown in Fig. 2. Here the light source is a mercury arc lamp from which we select wavelengths around 365 nm (i-line) using an interference filter. A silica plano-convex lens homogenizes the light beam to obtain a uniform illumination. The beam is then reflected by two aluminum mirrors to impinge on the DMD at the required angle (see Fig. 3).

2.2. Microscope objective

The photoreduction lens is the core component of the projection system and its imaging quality directly influences the characteristics of the patterns plotted in the photoresist [6]. The pattern reflected by the DMD is imaged onto the substrate with a $10\times$ standard

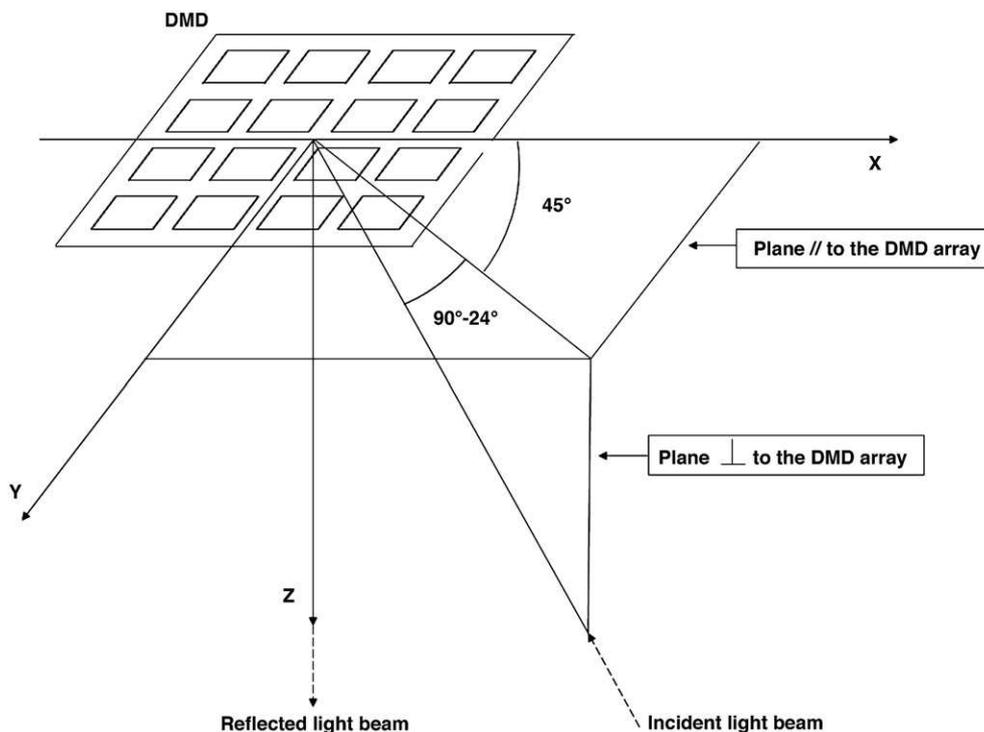


Fig. 2. 3D schematic plot illustrating the incident light beam illuminating the DMD at an angle of 45° to the micromirror array axes and at $90^\circ - 24^\circ$ to the plane of the DMD array in order to obtain the reflected, modulated light beam in the orthogonal direction to the plane of the DMD array.

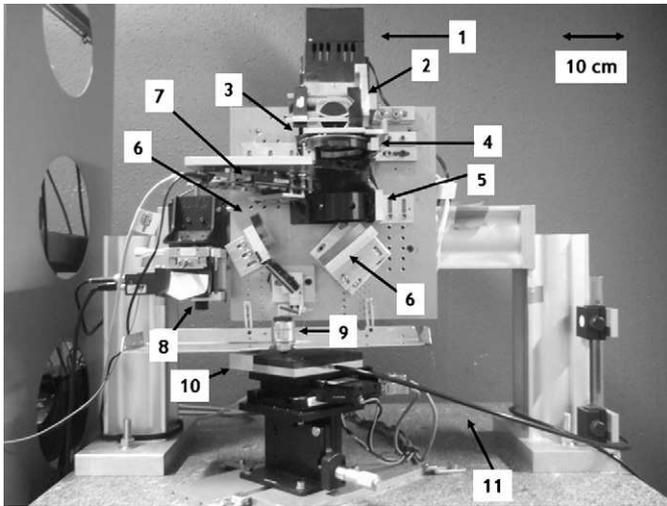


Fig. 3. DMD-based photoplotter: (1) mercury arc lamp, (2) cold mirror, (3) interference filter, (4) shutter, (5) pure silica condenser, (6) aluminum mirrors, (7) DMD, (8) CCD camera, (9) microscope objective, (10) XY tables and (11) tube connecting the XY tables to a vacuum pump.

microscope objective that is reverse mounted to reduce the DMD image rather than to enlarge it. The numerical aperture is 0.25. This microscope objective resolves the reflective central area as well as the opaque interpixel space ($0.2\ \mu\text{m}$) of the separate SLM pixels, whose exposed area at the photoresist level is approximately $1.3 \times 1.3\ \mu\text{m}^2$.

2.3. XY tables

The substrate is held on the XY tables thanks to a vacuum check. The XY tables are based on Nanomotion drives from Feinmess Dresden GmbH [19] piloted by the host computer through a Industry Standard Architecture (ISA) controller card from ACS Motion Control. The XY tables cover a total range of $5 \times 5\ \text{cm}^2$. Optical encoders give real-time information on the table position with a theoretical resolution of 100 nm. The manufacturer-specified repeatability is $\pm 300\ \text{nm}$.

2.4. Operating software

The operating software to control and synchronize the image display on the SLM, the XY table translations and the shutter (used to protect the photoresist during long table movements since the DMD contrast while excellent is not infinite) is based on the existing software that controls the LCD photoplotter. This software, written in C++, was adapted to work under the Windows operating system.

3. Experimental results

After careful system alignment, particularly the parallelism of the DMD and XY table planes and axes, first test structures were fabricated using the plotting techniques developed in [9]. Unless stated otherwise, all the following experimental structures were plotted in SHIPLEY S1800 photoresist series, in layers ranging from a few hundred nanometers to a few microns, using the development conditions described in [9].

3.1. Binary direct write

Binary direct write consists of sending binary images to the SLM and exposing the photoresist for durations such that areas of photoresist corresponding to an illuminated SLM pixel are removed completely down to the substrate when developed [9]. With a $10\times$ reduction factor,

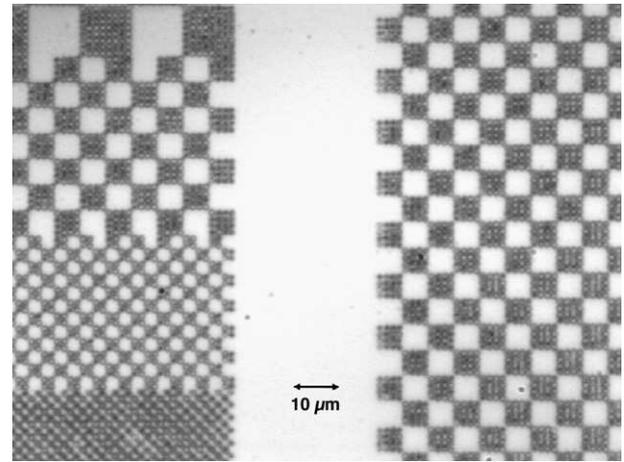


Fig. 4. Picture of a test file obtained using an interferometric microscope. The DMD pixels, corresponding to the illuminated micromirrors, are resolved in the photoresist ($1.3 \times 1.3\ \mu\text{m}^2$) and appear in gray.

the pixel size at the photoresist level is about $1.3 \times 1.3\ \mu\text{m}^2$ with a theoretical interpixel area around 200 nm (see Fig. 4). The smallest feature size of plotted structures is clearly improved compared to the LCD photoplotter ($3 \times 5\ \mu\text{m}^2$ pixels with $1\ \mu\text{m}$ gaps). Fig. 4 indicates that the individual DMD pixels are resolvable – minimum feature size may even be better but with such structures we approach the maximum resolving power of the optical microscope we use to observe them. Our so-called “super-resolution” (SR) plotting technique (data are plotted by displaying several successive images onto the SLM and performing very small translations of the XY tables between each exposure to fill in the small unexposed areas corresponding to the SLM interpixel gap; for a complete description of the SR technique see [9,10]) is used to eliminate the pixelization effect with a 2 interleave factor, again an improvement on the LCD photoplotter in terms of plot rate where an interleave factor of 6 was necessary. Overall, the plot times are shorter for the fabrication of elements with improved resolution. With the improved direct-write resolution, binary microstructures can now be fabricated for a wide range of applications, e.g. chrome photomasks [20,21], optical gratings such as circular Damman gratings (CDGs) [22], custom liquid crystal displays [23] and even 2D photonic crystal structures [24].

3.2. Multilevel direct write

Thanks to the improved structure resolution obtained in the photoresist with the DMD photoplotter, we have been able to extend the direct-write technique to different application fields such as computer generated holograms (CGHs) and integrated optics structures. In our experiments, 3D components are etched using the multilevel direct-write technique developed in [9].

3.2.1. Computer generated holograms

CGHs play an important role in a variety of applications in modern optics. Such applications include beam shaping, image processing and optical testing [25,26]. CGHs fabricated with the DMD photoplotter are phase holograms, exposed in a thin photoresist layer coated onto a glass substrate. The phase levels are defined by the different etch depths obtained in the resist after development. An He–Ne ($\lambda = 633\ \text{nm}$) is used to illuminate the holograms and produce the output pattern. Fig. 5 shows a 4 phase level hologram fabricated in a $1\ \mu\text{m}$ thick layer of SHIPLEY S1813 photoresist. Here, the desired diffraction pattern is a ring with central spot, but more complex CGHs can also be fabricated with the DMD photoplotter, such as those realized in [27].

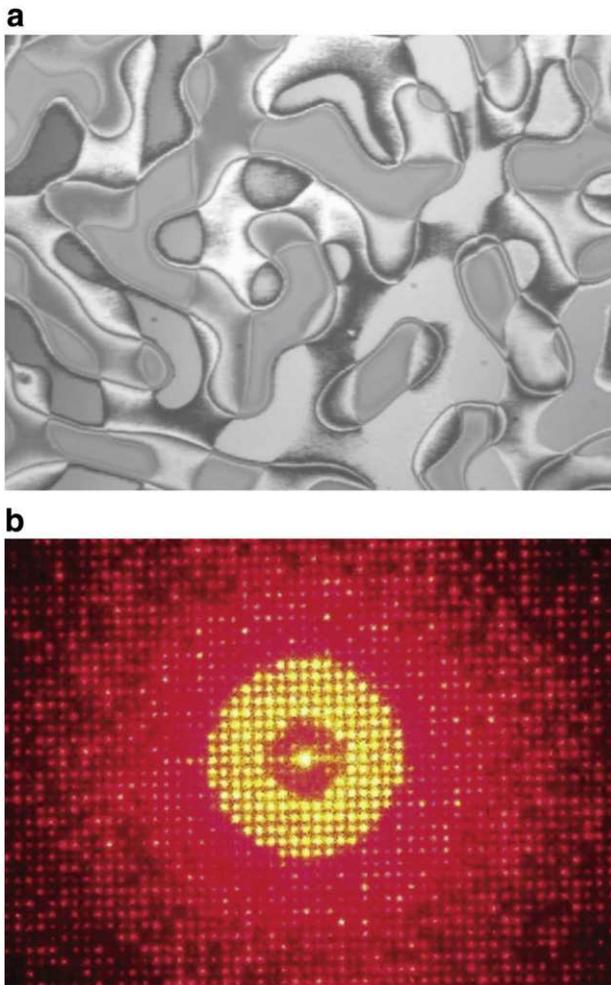


Fig. 5. Computer generated hologram (CGH). (a) Picture obtained using an interferometric microscope of a 4 phase level CGH. The different gray levels code the different etched depths. (b) Diffractive pattern obtained using an He–Ne laser to replay the hologram fabricated with the DMD photoplotter.

3.2.2. Planar optical waveguides

With the ever-increasing demand for bandwidth in telecommunications networks, optical communications technologies in general and fiber to the home (FTTH) in particular are currently developing rapidly. Optical waveguide technologies, especially with three dimensional structures, are attractive as potentially low-cost solutions in replying to this demand [28]. Since waveguide manufacture is almost exclusively lithographic mask based, most planar optical waveguides are restricted to two dimensional structures which limit their performance and possible applications. Thanks to the ability of the DMD photoplotter to simultaneously direct-write binary and multilevel structures, waveguides and 3D structures such as tapers or gratings can be fabricated. The resulting structures can then be used as a “master” for low-cost nano-imprint [21,29] reproduction.

- **Tapers:** To minimize coupling loss between two devices with dissimilar mode shapes/sizes, e.g. waveguide and fiber, waveguide tapers can be inserted between both components [28]. With the DMD photoplotter, both in and out-of-plane tapers have been realized, such as periodic segmented tapers and linear double tapers. A periodic segmented taper is a binary optical structure with a longitudinal refractive index variation that modifies the guided mode size in two dimensions [30]. A periodic succession of constant thickness segments constitutes such a taper (see Fig. 6). The width depends on the waveguide to which the taper is connected. The

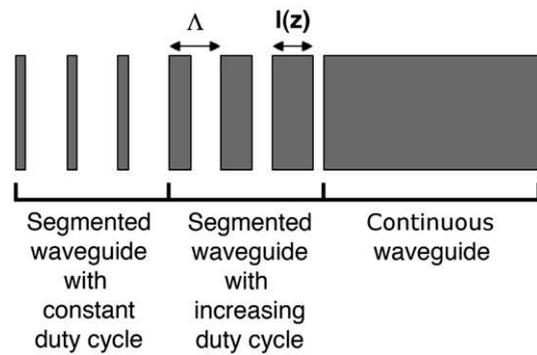


Fig. 6. Diagram of a periodic segmented taper. The segments follow each other with periodicity Λ . The duty cycle $l(z)$ is constant in the transition guide and varies linearly in the part of the guide that modifies the mode, increasing to reduce entrance field dimensions or decreasing in the inverse case.

thickness of tapers fabricated with the DMD photoplotter is $3\ \mu\text{m}$ and the period Λ $50\ \mu\text{m}$. The segment length $l(z)$, formed by the cyclically increasing guide duty cycle, increases linearly over a distance of 2 mm, as observed in Fig. 7. A linear double taper is a 3D cone shaped structure [31]. Its fabrication requires precise control of the vertical etching. To obtain optimal efficiency, the height decrease (or increase) in both directions must be very gradual to minimize reflection losses along the taper. Fig. 8 shows a linear double taper fabricated with the DMD photoplotter by adapting the exposure duration in order to continuously reduce the guide width, but also to diminish its height.

- **Long period gratings:** A long period grating (LPG), used in optical fiber telecommunications systems [32,33], is an axially periodic refractive index variation written into the core of an optical waveguide [34]. The advantage of the DMD photoplotter, in comparison with other inscription techniques such as point-by-point femtosecond laser write [35,36], is to direct-write both the waveguide and the LPG structure simultaneously in a single processing step. The LPG structures, fabricated in photoresist, were etched into a $1\ \mu\text{m}$ thick layer with pitches varying from 6 to $40\ \mu\text{m}$ in $3\ \mu\text{m}$ wide waveguides. The result is shown in Fig. 9.

4. New photosensitive materials

The photoplotter, designed to work at wavelengths around $365\ \text{nm}$, has been shown to allow the fabrication in photoresist of

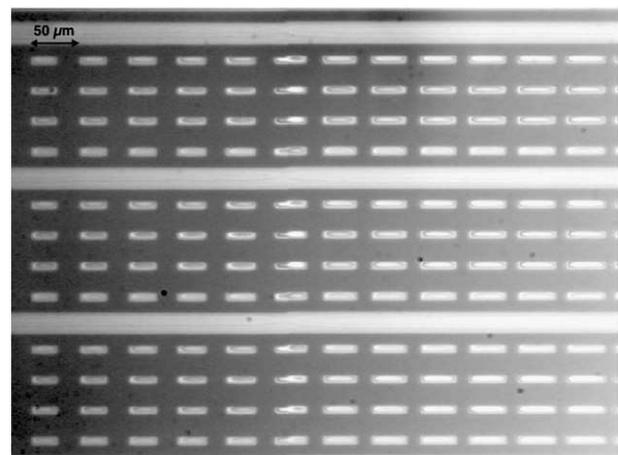
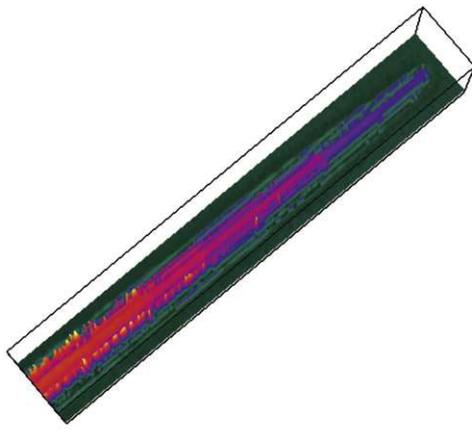


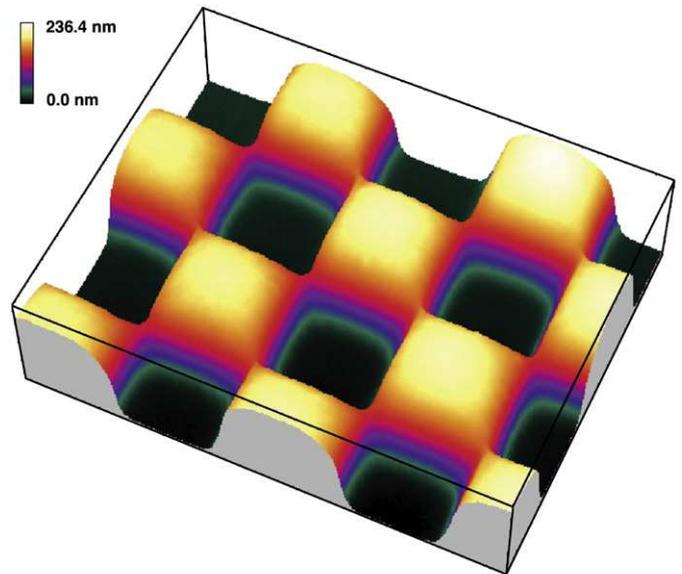
Fig. 7. Picture of 12 adjacent segmented taper structures on rectangular waveguides of width $10\ \mu\text{m}$ and thickness $3\ \mu\text{m}$, obtained using an interferometric microscope. Only the waveguides (light gray) in photoresist are present on the substrate after development. The segments follow one another with periodicity Λ of $50\ \mu\text{m}$.



Magnification: x50.0 Lateral dimension: 89.0 μm x 13.4 μm

Fig. 8. 3D plot of a preliminary linear double taper test structure, obtained using an interferometric microscope. The photoresist surrounding the waveguide has been removed by the development. Colour codes the structure height.

complex binary and multilevel structures for diverse applications; in particular for integrated optics and planar optical waveguides with microstructures, such as tapers or LPGs. However, although SHIPLEY S1800 photoresist series is an acceptable material for prototype CGHs, the CGH and waveguide microstructures cannot usually be commercialized directly because of the low resistance of photoresist to chemical and physical attack, its relatively low transparency to optical telecommunications wavelengths and its small temperature range ($\approx 120^\circ\text{C}$). In order to fabricate operational waveguides, but also to



Magnification: x50.0 Lateral dimension: 88.3 μm x 68.5 μm

Fig. 10. 3D interferometric microscope view of a test structure exposed by direct write into the ORMOCER resist. The squares are $22\ \mu\text{m} \times 22\ \mu\text{m}$.

fabricate tougher CGH components, the direct-write technique has been extended to other photosensitive materials with improved stability and transparency.

4.1. ORMOCER

ORMOCER is a family of organic–inorganic hybrid polymers [13,14] that have recently been commercialized by Micro Resist Technology GmbH (Berlin, Germany) [37]. When fully processed they present good temperature, chemical and physical stabilities. Their refractive index is around 1.492 and can be tailored for use as waveguide core or cladding material. These materials also have good transparency to telecom wavelengths: optical attenuation is low in the NIR around 1.31 and 1.55 μm [13]. More interestingly for our requirements, these polymers are photosensitive at 365 nm, the write wavelength of the DMD photoplotter. Our initial test plots (Fig. 10) into ORMOCER materials are very promising, clearly demonstrating that direct write is possible into these materials with the DMD photoplotter. This opens a route to the direct-write fabrication of high resistance CGHs and functional optical waveguides.

4.2. Poly(vinyl cinnamate)

Another attractive photosensitive material for the direct write of integrated optics is the poly(vinyl cinnamate) (PVCi) polymer, studied at our partner laboratory, the Centre Commun Lannionnais d'Optique (CCLO). This polymer cross-links under UV irradiation around 300–320 nm giving refractive index changes up to 2.5×10^{-2} even in the NIR, making it highly suitable for the photostructuring of waveguides for telecommunications wavelengths [15]. At present, waveguide fabrication is performed with expensive fixed photomasks [2]. Our current photoplotter uses UV illumination around 365 nm where the sensitivity of the PVCi appears, from our initial test plots, to be too low to produce significant index change. We are now updating the photoplotter light source to a xenon flash lamp with a wider spectrum which should allow us to initiate direct write of waveguide structures in PVCi – to further increase optical efficiency of the system, the inclusion of optimised UV anti-reflection coating DMD and projection optics are also under study.

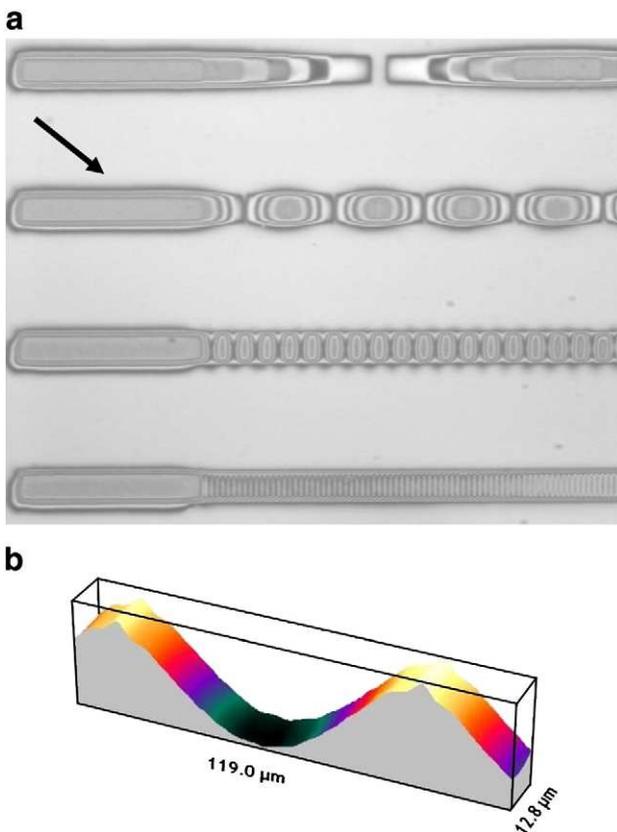


Fig. 9. Long period Bragg grating structures. (a) Picture of 4 long period Bragg gratings with pitches varying from 6 to 40 μm in 3 μm wide waveguides. (b) 3D interferometric microscope view of the structure indicated by an arrow on the top picture.

5. Conclusion

To improve the fabricated structure critical dimensions (CDs), and also to extend the parallel direct-write technique to other attractive photosensitive materials, a new prototype photoplotter, based on the same principle and software, as that presented in [9], has been designed and assembled with a greater reduction factor lens and a reflective DMD microdisplay to work at wavelengths around 365 nm. Binary and multilevel components, with CDs in the 1 μm range, have been fabricated. The initial results, in standard photoresist, show significant improvement on the previous photoplotter and the preliminary test plots in other photosensitive materials, such as ORMOCER, are particularly promising, opening new applications for the technique. In addition, we have demonstrated that the direct parallel write of planar optical waveguide structures is feasible, bringing the advantages of speed, flexibility (2D and 3D structures) and cost, particularly for prototyping, that this technique has shown in other application fields. With a view to continuing improvement of the CD of the photoplotted structures, our current work centres on the design and implementation of a new illumination system based on a xenon flash lamp. This will allow us to work with a range of different wavelengths (365 nm and 320 nm) and photosensitive materials further increasing the versatility of the DMD photoplotter.

Acknowledgments

This work was supported in part by the European Commission (EC) 6th Framework Programme (FP6), under the (STREP) project NMP-4-CT-2005-017160 (NewTon) and the Breton Regional project PRINT. We gratefully acknowledge the contribution of Pierre Pellat-Finet and Rafael Torres in the design and computation of the diffractive elements, fruitful discussions with Christiane Carré and Isabelle Hardy and technical assistance from Sylvie Grégoire. We would also like to thank the reviewer for constructive comments on an earlier version of the manuscript.

References

- [1] H.C. Hsieh, J. Hung, A. Chin, et al., Proc. SPIE 5130 (2003) 4.
- [2] H. Martinsson, T. Sandstrom, A. Bleeker, et al., J. Microlithogr. Microfabr. Microsyst. 4 (1) (2005) 11003.
- [3] M. Jianping, D. Ximang, L. Yantano, Proc. SPIE 6836 (2007) 683612.
- [4] D. Gil, R. Menon, X. Tang, et al., J. Vac. Sci. Technol. B 20 (6) (2002) 2597.
- [5] Q. Peng, S. Liu, Y. Guo, et al., Opt. Eng. 42 (2) (2003) 2595.
- [6] Y. Gao, T. Sheng, J. Chen, et al., Optik (Jena) 116 (7) (2005) 303.
- [7] H. Xingdao, L. Kaiyuan, G. Yongying, Proc. SPIE 6832 (2007) 68322J.
- [8] D. Smith, D. Klenk, Proc. SPIE 7210 (2009) 72100K.
- [9] M.V. Kessels, M. El Bouz, R. Pagan, et al., J. Microlithogr., Microfabr. Microsyst. 6 (3) (2007) 03300.
- [10] M.V. Kessels, K. Heggarty, Microelectron. Eng. 86 (2009) 2385.
- [11] M.R. Douglass, Proc. SPIE 4980 (2003) 1.
- [12] D. Dudley, W. Duncan, J. Slaughter, Proc. SPIE 4985 (2003) 14.
- [13] U. Streppel, P. Dannberg, C. Wächter, et al., Opt. Mater. 21 (1–3) (2002) 475.
- [14] C. Sanchez, B. Julian, P. Belleville, et al., J. Mater. Chem. 15 (33–36) (2005) 3559.
- [15] I. Assaid, D. Bosc, I. Hardy, J. Phys. Chem. B 108 (2004) 2801.
- [16] D. Bosc, P. Grosso, I. Hardy, et al., Opt. Commun. 235 (2004) 281.
- [17] I. Hardy, P. Grosso, D. Bosc, Proc. SPIE 5825 (2005) 209.
- [18] B. Lu, G. Yiqing, L. NingNing, et al., Proc. SPIE 6836 (2007) 68360V.
- [19] Feinmess Dresden GmbH, Dresden, Germany, 2010 See <http://www.feinmess.de/>.
- [20] M. Henini III, Vs Rev. 12 (6) (1999) 18.
- [21] J.G. Maltabes, R.S. Mackay, Microelectron. Eng. 83 (4–9) (2006) 933.
- [22] C. Zhou, J. Jia, L. Liu, Opt. Lett. 28 (22) (2003) 2174.
- [23] R.A. Street, W.S. Wong, S.E. Ready, et al., Mater. Today 9 (4) (2006) 32.
- [24] C.G. Choi, C.S. Kee, H. Schiff, Curr. Appl. Phys. 6 (1) (2006) e8.
- [25] F. Wyrowski, R. Hauck, O. Bryngdahl, J. Opt. Soc. Am. A 5 (7) (1988) 1058.
- [26] P. Zhou, J. Purge, Appl. Opt. 46 (26) (2007) 6572.
- [27] M. El Bouz, K. Heggarty, Opt. Comm. 180 (2000) 21.
- [28] B. Cai, K. Komatsu, O. Sugilar, et al., Proc. SPIE 6890 (2008) 68901B.
- [29] A. Perentos, G. Kostovski, A. Mitchell, IEEE Photon. Technol. Lett. 17 (12) (2005) 2595.
- [30] M.H. Chou, M.A. Arbore, M.M. Fejer, Opt. Lett. 21 (11) (1996) 794.
- [31] R.C. Johnson, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. MTT-7 (1959) 143.
- [32] V. Bhatia, Opt. Exp. 4 (11) (1999) 457.
- [33] T. Mizunami, Y. Sho, K. Yamamoto, et al., Opt. Commun. 282 (2009) 4699.
- [34] T. Allsop, K. Kalli, K. Zhou, et al., Opt. Commun. 281 (2008) 5092.
- [35] M.L. Aslund, N. Jovanovic, N. Grothooff, et al., Opt. Expr. 16 (18) (2008) 14248.
- [36] K. Hirao, K. Miura, J. Non-Cryst. Solids 239 (1–3) (1998) 91.
- [37] Micro Resist Technology GmbH, Berlin, Germany, 2010 See <http://www.micro-resist.de/>.

Annexe B

Profilomètre à microscopie interférométrique

B.1 Microscope interférométrique

Les microscopes interférentiels sont, dans leur version la plus simplifiée, constitués d'un microscope optique associé à un interféromètre à deux faisceaux pour lequel le chemin optique de l'un des bras de l'interféromètre peut

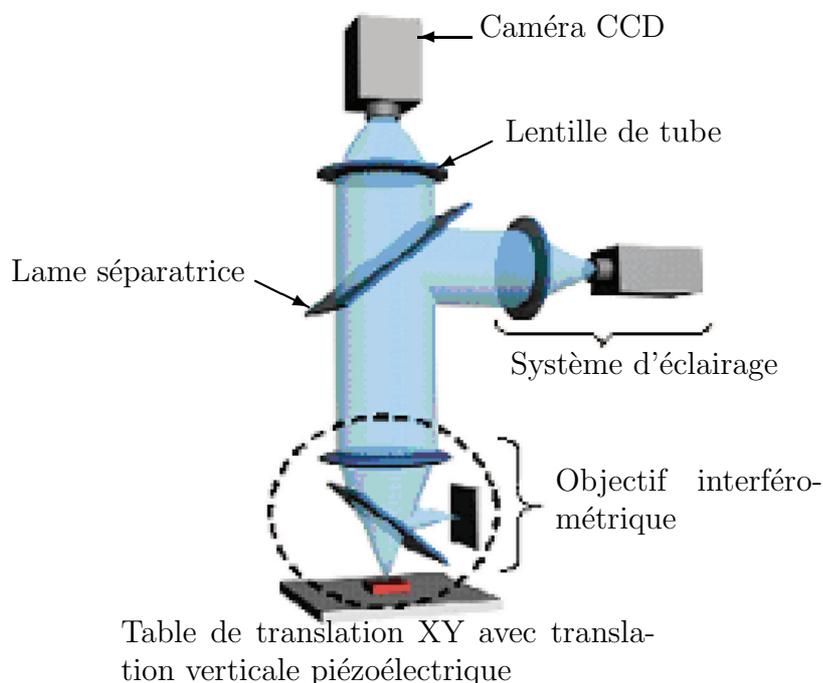


FIGURE B.1 – Schéma d'un microscope interférentiel. Les microscopes sont munis d'une série d'objectifs de divers grossissements allant de x5 à x50. [1]

être ajusté avec précision, à l'aide d'un actionneur piézoélectrique par exemple. Dans sa configuration classique (figure B.1), le front d'onde incident est divisé en deux par une séparatrice. La recombinaison du faisceau de référence réfléchi par le miroir interne de l'interféromètre et du faisceau réfléchi par la surface à mesurer produit un interférogramme (figure B.1) qui est enregistré à l'aide de la caméra CCD. La source de lumière est, selon le type de mesure souhaitée, une source quasi monochrome ou de lumière blanche. A TELECOM Bretagne grâce à un jeu de filtres les deux sont possibles mais on choisit habituellement une fonctionnement en lumière blanche.

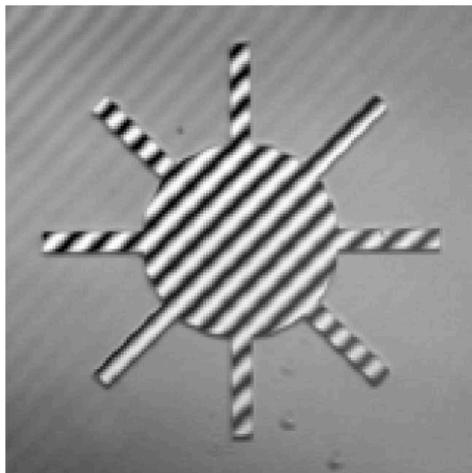


FIGURE B.2 – Interférogrammes obtenus par microscopie interférométrique d'un motif en Si. [1]

B.2 Profilometrie

Notre microscope interférométrique est doté d'un logiciel de commande qui capte les interférogrammes à l'aide d'une caméra CCD et les traite afin d'obtenir de cartes des profondeurs de nos composants. Notre microscope (figure B.3) possède la même architecture montrée dans la figure B.1, mais par contre l'objectif interférométrique est monté sur un translateur piézoélectrique afin de faire des mouvements nanométriques sur l'axe Z. Ce translateur piézoélectrique, fabriqué par PI¹, est connecté à un ordinateur via une électronique spécifique afin de bien gérer sa position en Z avec une précision < 1 nm.

Le logiciel fourni avec ce système sert à reconstruire la carte des profondeurs des échantillons à mesurer. La technique de reconstruction consiste à balayer en Z le substrat et à récupérer tous les interférogrammes sur le CCD monté en haut du microscope. La zone de balayage commence et se termine par des positions que nous choisissons où il n'y a pas de franges. Le logiciel

1. PI : Physik Instrument



FIGURE B.3 – Photo du microscope interférentiel dans la salle blanche de TÉLÉCOM Bretagne. Le microscope est muni d’objectifs interférométriques de grandissement soit $\times 10$ soit $\times 50$ avec un actionneur piézoélectrique en Z. Ce microscope est relié a un ordinateur via une électronique spécifique.

interprète les données de position du piézo et les franges des interférogrammes pour obtenir une carte des profondeurs.

La figure B.4 montre une capture d’écran du logiciel profilomètre. La partie principale montre la carte des profondeurs d’un composant où nous avons gravé un réseau sinusoïdale. La zone blanche en bas à droite de l’image montre une «coupe» verticale de ce composant au niveau de la ligne verte que nous avons dessinée sur la carte des profondeurs.

Sur la carte des profondeurs de la figure B.4, on remarque que les zones grises de la carte des profondeurs sont les zones non gravées, et les zones noires sont les zones les plus gravées. On remarque en outre que plus la couleur de gris est foncée, plus nous avons gravé profondément.

La carte des profondeurs de la figure B.4 montre aussi, sur les bords des structures des petites zones noires qui sont des artéfacts de mesure, plus précisément en haut à droite de la dernière ligne gravée. Ces zones ne signifient pas des erreurs de gravures mais se sont des erreurs de mesures dues soit à une saturation de la caméra CCD, soit à un manque de réflexion de lumière en cette zone parce que la pente de la structure est trop forte.

Verticalement (Z), la résolution de mesure du système est celle typique de l’interféromètre donc autour du nanomètre. Horizontalement cependant, la résolution est celle du microscope optique classique et dépend donc de l’objectif utilisé. Avec l’objectif $\times 50$ le CCD échantillonne le champ avec un pas de $0,17 \mu\text{m}$ mais les données sont convoluées par la fonction d’appareil de l’objectif. On estime la résolution horizontale maximale autour de $1 \mu\text{m}$. On voit donc qu’on arrive en limite des possibilités de notre microscope quand

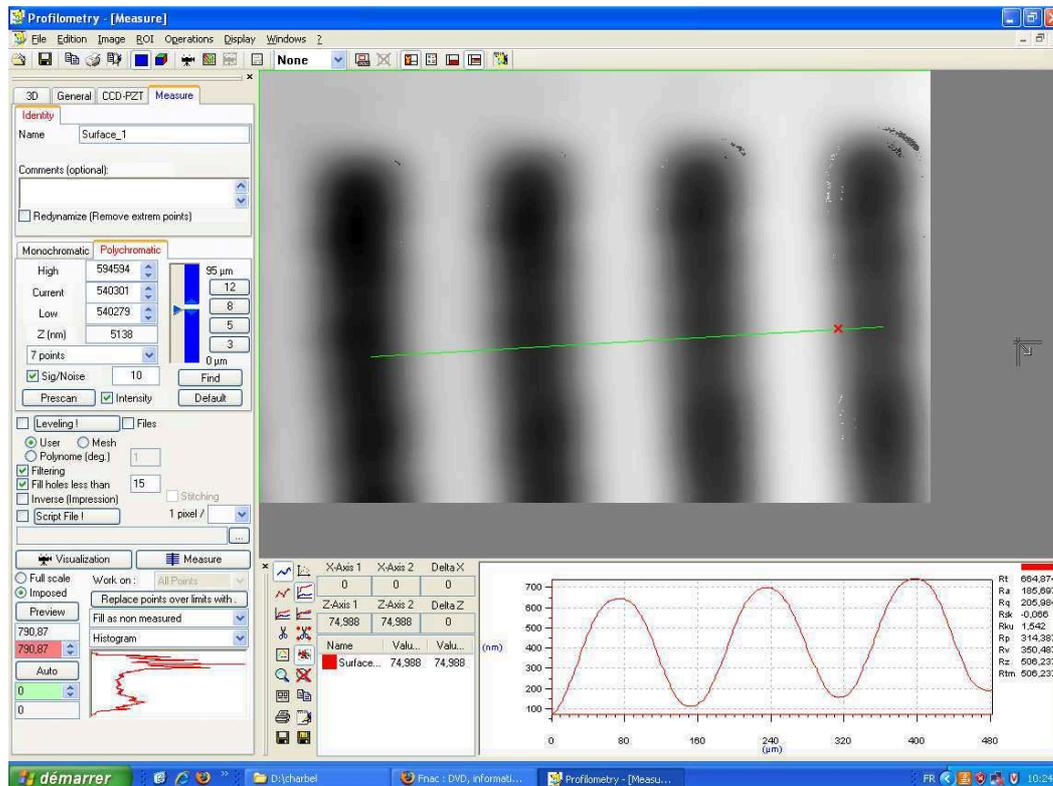


FIGURE B.4 – Capture d'écran du Logiciel.

nous fabriquons des structures submicroniques.

Bibliographie

- [1] C. Bréluzeau, A. Bosseboeuf, and S. Petitgrand, "Revue des méthodes de démodulation de phase pour la microscopie interférométrique et développements récents." <http://hal.inria.fr/inria-00000870/en/>, Nov. 2005.

Annexe C

Lampe flash *Xenon*

C.1 Spectre de la lampe flash *Xenon*

La figure C.1 montre la puissance émise pour différents longueurs d'onde allant de 200 nm à 1100 nm.

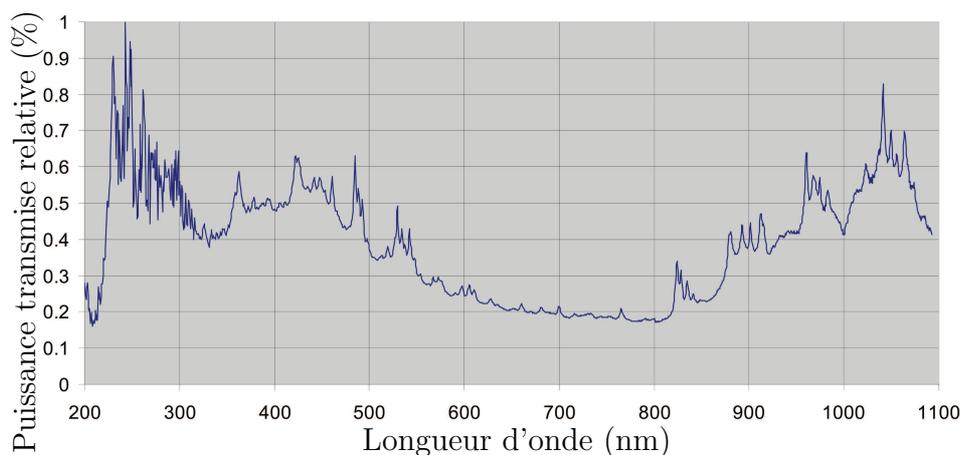


FIGURE C.1 – Spectre de la lampe flash *Xenon* [1, 2].

C.2 Schéma du circuit de Commande de la lampe Flash *Xenon*

A l'aide du logiciel *Eagle*, j'ai fait le schéma du circuit électronique de commande de la lampe flash (figure C.2). La figure C.3a montre le circuit de la carte électronique fabriqué du côté dessus et la figure C.3b montre le côté dessous.

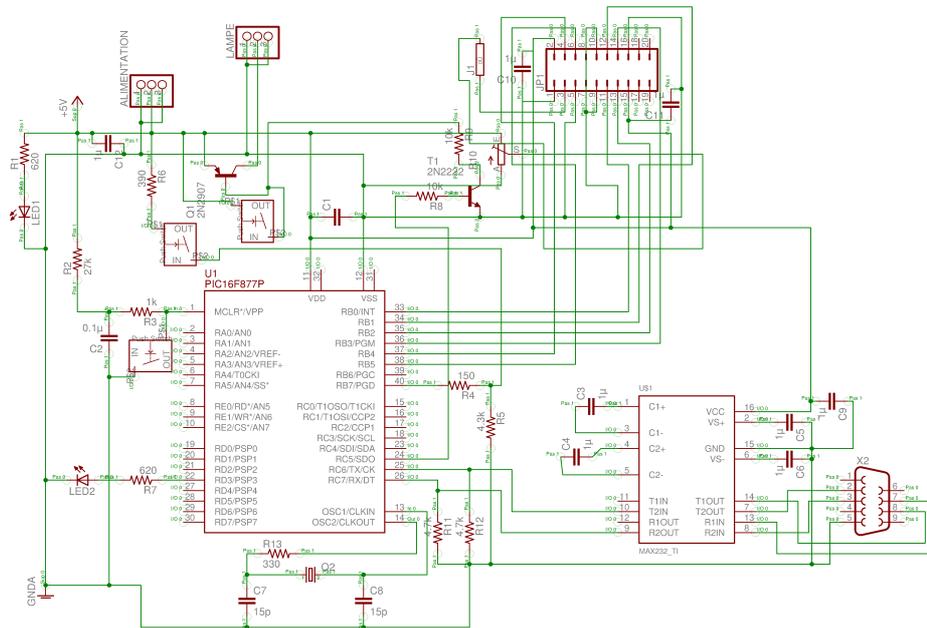
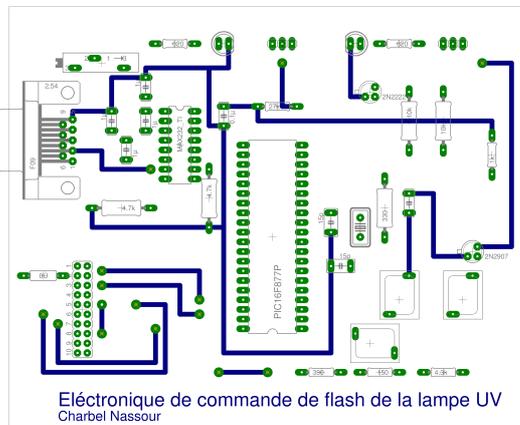
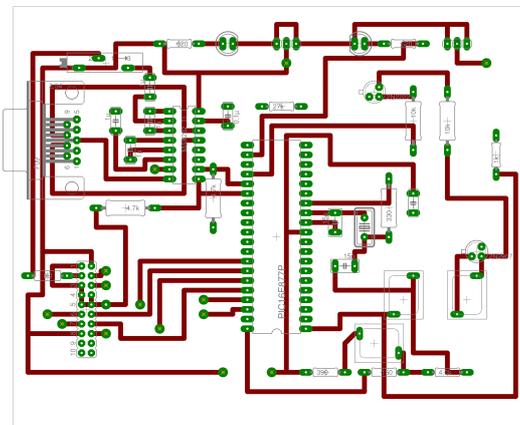


FIGURE C.2 – Schéma de conception de l'électronique de commande de la lampe flash *Xenon*.



(a) Côté dessus de la carte électronique



(b) Côté dessus de la carte électronique

FIGURE C.3 – Schéma de la carte électronique de commande de la lampe flash *Xenon*.

C.3 Liste des composants

Microcontrôleur

U1 PIC16F877P

Amplificateur opérationnel

U\$1 MAX232_TI

Condensateurs

C1 1 μ F
C2 0,1 μ F
C3 1 μ F
C4 1 μ F
C5 1 μ F
C6 1 μ F
C7 15 pF
C8 15 pF
C9 1 μ F
C10 1 μ F
C11 1 μ F
C12 1 μ F

Résistances

R1 620 Ω
R2 27 k Ω
R3 1 k Ω
R4 150 Ω
R5 4k3 Ω
R6 390 Ω
R7 620 Ω
R8 10 k Ω
R9 10 k Ω
R11 4k7 Ω
R12 4k7 Ω
R13 330 Ω
J1 0 Ω

Potentiomètres

R10 10 k Ω

Transistors

T1 2N2222

Q1 2N2907

Quartz

Q2 Quartz 19,6 MHz

Diodes

LED1 Diode Verte

LED2 Diode Rouge

Connecteurs

JP1 20 broches

LAMPE 3 broches

ALIMENTATION 3 broches

X2 RS232

Boutons

R\$1 Bouton push

R\$2 Bouton push

R\$3 Bouton push

Bibliographie

- [1] "High output xenon flashlamp fx4400, perkin-elmer optoelectronics."
<http://www.perkinelmer.com/>.
- [2] *Perkin-ElmerTM*, "Fx-4400 high output xenon flashlamp," tech. rep.
<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/perkinelmer/FX-4401.pdf>.

Annexe D

Spectres de réflexion du DMD

D.1 Spectres en réflexion des différents DMD

Les figures D.1 et D.2 montrent le pourcentage de transmission en fonction de la longueur d'onde incidente pour 3 DMD optimisé pour différents longueurs d'onde. Ces courbes de transmission sont fournies par *Texas instruments* indiquant la caractéristique de transmission de leurs DMD. Les courbes en bleu correspondent au DMD optimisé pour l'ultraviolet, les courbes vertes pour le DMD optimisé pour le visible et les courbes rouges à celui qui est optimisé pour l'infrarouge.

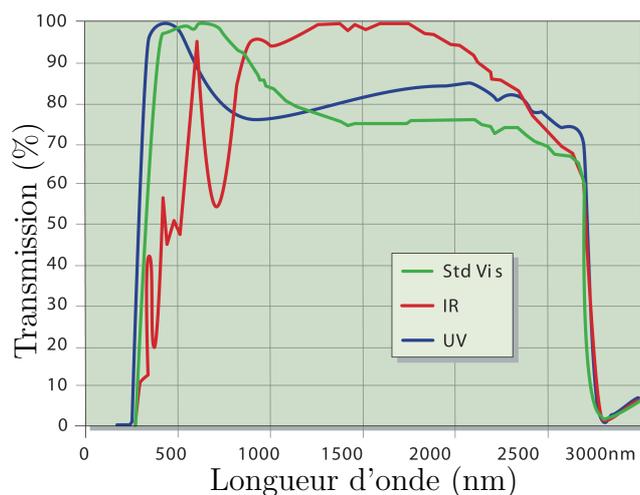


FIGURE D.1 – Pourcentage de transmission des DMD pour les longueurs d'ondes comprises entre 0 et 3000 nm [1].

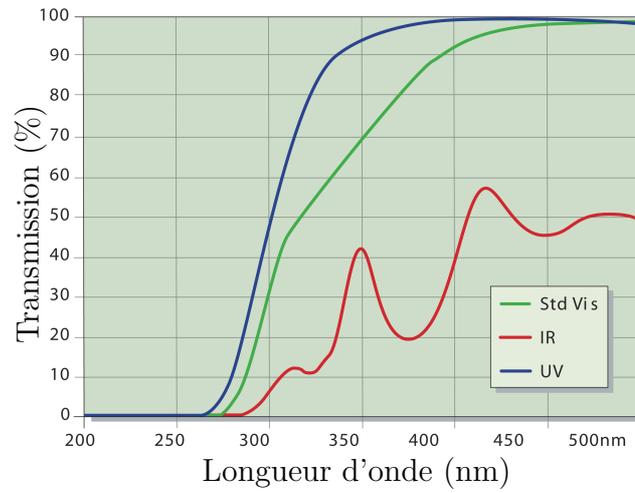


FIGURE D.2 – Pourcentage de transmission des DMD pour les longueurs d'ondes comprises entre 0 et 500 nm [1].

Bibliographie

- [1] *Texas Instruments*, “DLP DMD discovery™1100 chip set,” tech. rep., 2004. <http://www.dmddiscovery.com>.

Annexe E

Code de quelques routines du logiciel du pilotage du DMD

E.1 Routines des platines de translation

Les routines principales de commande des platines de translation sont :

- `C7XX_ConnectRS232(const int nPortNr, long nBaudRate)` : initialise la connexion des platines via le port série de numéro `nPortNr` avec une bande passante de `nBaudRate` bits par seconde.
- `C7XX_MOV(int ID, const char* szAxes, const double* pdValarray)` : déplace les axes `szAxes` des platines référencés par la variable `ID` à la position `XY` enregistrée dans le tableau `pdValarray`
- `C7XX_CloseConnection(int ID)` : ferme la connexion avant la sortie du logiciel afin d'établir une nouvelle connexion avec les platines lors d'une prochaine insolation.

E.2 Routines de la lampe flash *Xenon*

Les routines principales de commande de la lampe flash *Xenon* sont :

- `Lampe_Init()` : lance la connexion avec la lampe sur le port RS232.
- `Lampe_param_Flash()` : paramètre les variables nécessaires aux flashes qui sont fournis par la ligne de commande du lancement du logiciel du pilotage.
- `Lampe_On()` : envoie les paramètres des flashes vers la lampe et lance l'insolation.
- `Lampe_WaitTime()` : rend le logiciel de pilotage en attente de la fin d'insolation.
- `Lampe_Close()` : assure la fermeture de la connexion série.

Annexe F

Électronique du système de l'autofocus

F.1 Schéma du circuit de Commande de l'autofocus

A l'aide du logiciel *Eagle* j'ai fait le schéma du circuit électronique de commande de l'autofocus (figure F.1). La figure F.2a montre le circuit de la carte électronique fabriqué du côté de dessus et la figure F.2b montre le côté de dessous.

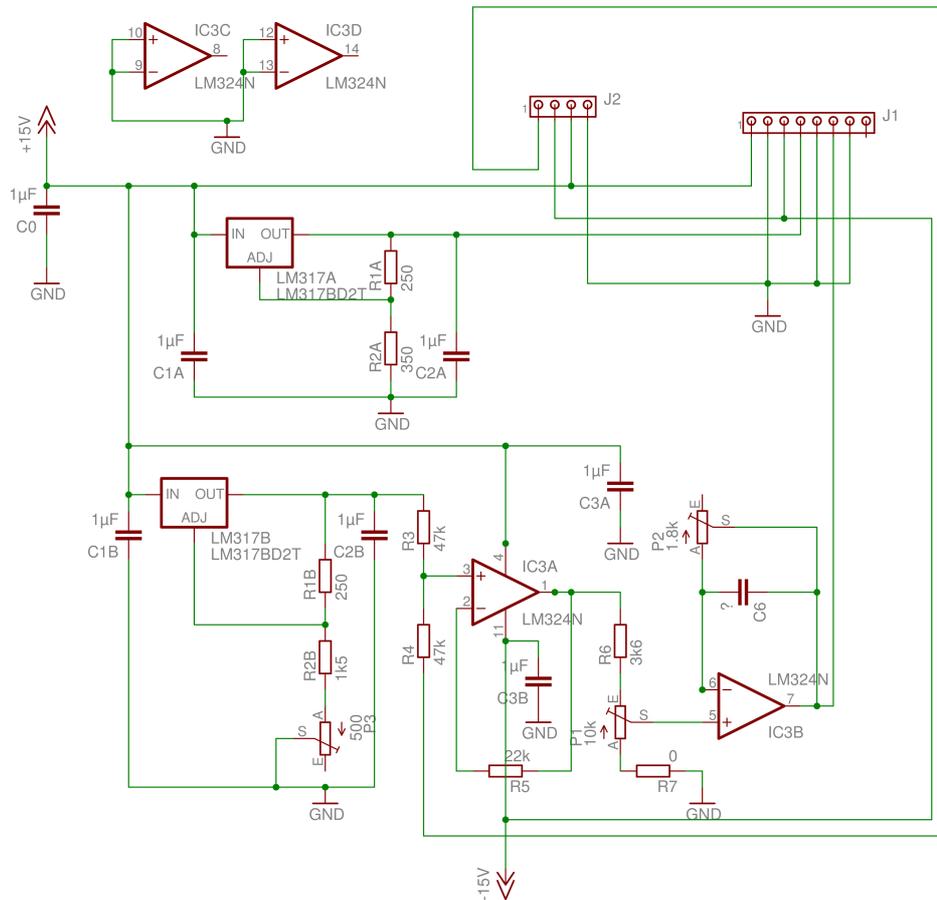


FIGURE F.1 – Schéma de conception de l'électronique de commande de l'autofocus.

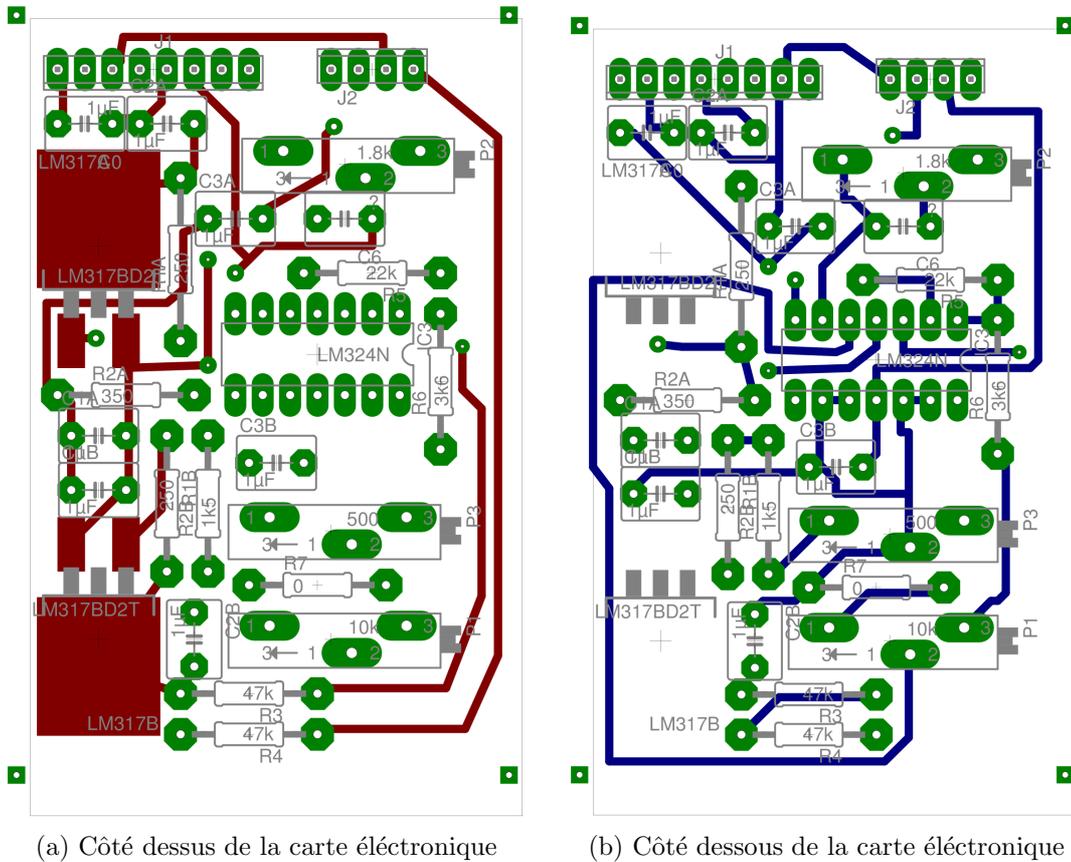


FIGURE F.2 – Schéma de la carte électronique de commande de l'autofocus.

F.2 Liste des composants

Amplificateur opérationnel

IC3	LM324N
LM317	LM317BD2T

Condensateurs

C0	1 μ F
C1A	1 μ F
C2A	1 μ F
C1B	1 μ F
C2B	1 μ F
C3A	1 μ F
C3B	1 μ F

C6 N/A

Résistances

R1A 250 Ω

R2A 350 Ω

R1B 250 Ω

R2B 1k5 Ω

R3 47 k Ω

R4 47 k Ω

R5 22 k Ω

R6 3k6 Ω

R7 0 Ω

Potentiomètres

P1 10 k Ω

P2 1k8 Ω

P3 500 Ω

Connecteurs

J1 4 broches

J2 8 broches

Acronymes

SLM	Spatial light Modulator <i>Modulateur spatial de lumière</i>
LCD	Liquid Crystal Display
DMD	Digital Micro-mirror Device
ITO	Indium Titanium Oxide
VGA	Video Graphic Array
DVI	Digital Video Interface
ISA	Industry Standard Architecture
SDL	Simple DirectMedia Layer
BIOS	Basic Input/Output System
2PP	Two-Photon Polymerization <i>Polymérisation à deux photon</i>
NA	Numerical Aperture <i>Ouverture numérique</i>
CD	Critical Dimension <i>Dimension critique</i>
RET	Resolution Enhancement Technique
OAI	Off-Axis Illumination
FIB	Focused Ion Beam
DOE	Diffractive Optical Elements
EOD	Élément Optique Diffractif
CD	Compact Disc
DVD	Digital Versatile Disc
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
DRAWMAP	Direct Parallel-Write Multi-Application photoplotter
SDL	Simple DirectMedia Layer
LUT	Look Up Table <i>Table de correspondance</i>
CRT	Cathode Ray Tube
LED	Light Emitting Diode

WUXGA	Widescreen Ultra eXtended Graphics Array
LCoS	Liquid Crystal on Silicon
ADP	Absorption à deux photon
CL	Cristaux liquides
dll	<i>Dynamic-link library</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
TI	<i>Texas Instruments Inc.</i>
DLP	<i>Digital Light Processing™</i>
MEMs	<i>Microelectromechanical systems</i>
PSD	<i>Position Sensitive Detector</i>
N/A	Not available
	<i>Non disponible</i>

Table des figures

1.1	Fabrication des semi-conducteurs	7
1.2	Guide d'onde Coupleur X	8
1.3	Image de diffraction d'un EOD	8
1.4	Photolithographie par contact	10
1.5	Photolithographie par projection	12
1.6	Photolitho 3D à l'aide de plusieurs photomasques binaires . .	13
1.7	Photolithographie 3D par filtrage spatial	14
1.8	Photolithographie 3D par niveaux de gris	15
1.9	Les techniques d'accroissement de la résolution	18
1.10	Principe d'un système d'écriture directe par faisceau laser . . .	20
1.11	Système d'écriture directe par faisceau d'électrons	21
1.12	Schéma illustratif du phototraceur LCD et DMD	25
2.1	Schéma illustratif du fonctionnement des SLM	36
2.2	Les deux types de configurations des SLM	40
2.3	Schéma illustratif du fonctionnement des SLM	40
2.4	Ellipsoïde des indices	41
2.5	Coupe d'un pixel cristal liquide en transmission	42
2.6	Coupe d'un pixel cristal liquide nématique en hélice	43
2.7	Cristal liquide nématique en présence d'un champs électrique .	43
2.8	Un exemple d'un DMD	44
2.9	Montage optique du caractérisation du SLM <i>Holoeye</i>	46
2.10	Photo du SLM <i>Holoeye</i>	47
2.11	Puissance du faisceau lumineux réfléchi avant la nouvelle <i>LUT</i>	48
2.12	Puissance du faisceau lumineux réfléchi après la nouvelle <i>LUT</i>	49
2.13	Plan de <i>fourier</i> d'un réseau binaire	50
2.14	L'insolation du réseau sinusoïdal sur la photorésine	51
3.1	Schéma illustratif du phototraceur LCD	56
3.2	Photo du phototraceur LCD	57
3.3	Représentation schématique d'un écran LCD de 24 pixels . . .	58
3.4	Micro-écran LCD monté sur la colonne de réduction	59
3.5	Schéma d'un pixel au niveau de la photorésine	60

3.6	Découpage d'une structure en imagerie 800 × 600 pixels	61
3.7	Insolation d'un damier avec le LCD TL Electronic	62
3.8	Figure de la procédure d'une super résolution	64
3.9	Images des pixels individuels gravé sur la photorésine	66
3.10	Images d'insolation qui montre le contraste	67
3.11	Effet d'augmentation de la surface insolée	68
3.12	Défauts de gravure dus aux effets de bordures	68
3.13	Image de test de résolution	69
3.14	Image d'insolation qui montre la résolution du phototraceur	70
3.15	Micro-écran LCD Epson monté sur la colonne de réduction	71
3.16	Focalisation de l'image du micro-écran sur le substrat	73
3.17	Réglage du parallélisme des plans du substrat et du SLM	74
3.18	Focalisation de l'image du micro-écran sur le substrat	75
3.19	Photo du phototraceur LCD <i>Epson</i>	76
3.20	Images des pixels individuel du SLM Epson	77
3.21	Contraste d'un composant fabriqué à l'aide de l'écran <i>Epson</i>	78
3.22	Effet d'augmentation de la surface insolée avec le SLM Epson	79
3.23	Élimination de l'effet de bord avec le SLM <i>Epson</i>	80
3.24	Résolution du phototraceur avec le SLM Epson	81
3.25	Gravures des lignes montrant la limite de résolution	81
3.26	Cartographie 3D des lignes de largeur 1 μm séparées de 1 μm	82
3.27	Images de test d'insolation de niveaux de gris	83
3.28	f(Niveau de gris) = Profondeur gravée	84
3.29	Carte des profondeurs 3D d'insolation d'un réseau blazé	88
4.1	Schéma du phototraceur DMD de Kessels	94
4.2	Schéma de 2 miroir de DMD TI	96
4.3	Principe opération du DMD	97
4.4	Réseaux de <i>Bragg</i> fabriqué par le phototraceur DMD	100
4.5	Schéma du phototraceur DMD par Emilie Bialic	102
4.6	Différence d'éclairage avec et sans guide	103
4.7	Photo du phototraceur actuel	104
4.8	Schéma du phototraceur DMD actuel	105
4.9	La mise en place du système de projection	106
4.10	Platines de translation du phototraceur DMD	108
4.11	Schéma représentatif de l'autofocus	109
4.12	Mise en place de l'autofocus	111
4.13	Réponse temporel de la position en variant le facteur K_p	114
4.14	Réponse temporelle de la position en variant le facteur K_i	115
4.15	Réponse temporel de la position en ayant les facteurs K_p, K_i et K_d	116
4.16	Insolations de la procédure réglage de l'illumination	119
4.17	Focalisation de l'image du DMD sur le substrat	120
4.18	Insolations de la procédure de focalisation	120

4.19	Parallélisme des axes de translation avec le plan de focalisation	121
4.20	Collage des imargettes	122
4.21	Rotation d'angle entre le DMD et les platines de translation . .	123
4.22	Limite de résolution	124
4.23	Hologramme binaire à l'aide du DMD	125
4.24	Photo du plan de diffraction d'un hologramme binaire	125
4.25	Hologramme binaire 20×20 pixels à l'aide du DMD	126
5.1	Processus d'absorption à deux photons	134
5.2	Réaction de photopolymérisation	137
5.3	Comparaison de l'absorption à un et à deux photons	138
5.4	Principe d'un système 2PP	139
5.5	Micro structures fabriquées par absorption à deux photons. . .	140
5.6	Micro structures fabriquées par absorption à deux photons. . .	141
5.7	Schéma de l'expérience mis en place par Takahashi	142
5.8	L'insolation obtenu par Takahashi	143
5.9	La technique de multi-focus par Obata	143
5.10	La technique d'ablation de Sanner	144
5.11	2PP parallèle par un DMD	145
5.12	Schéma de 2PP parallèle à LZH	146
5.13	Image de l'insolation de d'un réseau binaire par 2PP	147
5.14	Expérience à Saint-Étienne : SLM	149
5.15	Expérience à Saint-Étienne : Objectif et platines <i>XYZ</i>	149
5.16	Ablation sur inox	150
5.17	Ablation des imargettes sur inox	151
5.18	Ablation sur inox de 4 imargettes	152
5.19	Image du 2PP de la photorésine <i>Shipley</i>	153
5.20	Image du 2PP de la photorésine <i>Ormocomp</i>	153
B.1	Schéma d'un microscope interférentiel	173
B.2	Interférogrammes obtenus par microscopie interférométrique . .	174
B.3	Photo du microscope interférentiel de TB	175
B.4	Capture d'écran du Logiciel Profilo	176
C.1	Spectre de la lampe flash <i>Xenon</i>	177
C.2	Schéma de conception de commande de la lampe flash	178
C.3	Schéma de la carte électronique de la lampe flash	178
D.1	Pourcentage de transmission des DMD : $0 < \lambda < 3000nm$. . .	181
D.2	Pourcentage de transmission des DMD : $0 < \lambda < 500nm$. . .	182
F.1	Schéma de conception de commande de l'autofocus	186
F.2	Schéma de la carte électronique de l'autofocus	187