

# **NOUVELLES TECHNOLOGIES DE MICROSTRUCTURATION DE TYPE UV-LIGA ET FABRICATION DE COMPOSANTS MICROMÉCANIQUES**

THÈSE N° 1770 (1998)

PRÉSENTÉE AU DÉPARTEMENT DE MICROTECHNIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES TECHNIQUES

PAR

**Hubert LORENZ**

Ingénieur en microtechnique diplômé EPF  
originaire de Sion (VS)

acceptée sur proposition du jury:

Prof. Ph. Renaud, directeur de thèse  
Prof. M. Allen, corapporteur  
Prof. N. de Rooij, corapporteur  
Prof. D. Hauden, corapporteur  
M. P. Vettiger, corapporteur

Lausanne, EPFL  
1998

## Version abrégée

Ce travail présente des techniques de structuration de type UV-LIGA (Lithographie, Galvanisation und Abformung) basées sur l'utilisation de deux photorésists épais qui sont un film sec de la famille Riston<sup>®</sup> de DuPont et la nouvelle résine SU-8 développée originellement par IBM. Les procédés relatifs à la structuration de ces deux photorésists et des réalisations pratiques sont également présentés.

La résolution minimale des films Riston<sup>®</sup> a été déterminée à 30  $\mu\text{m}$  pour des lignes ou des tranchées, et à 40  $\mu\text{m}$  pour des cavités isolées dans un film de 50  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. Une technique pour la structuration de micromoules multi-niveaux a été mise au point. La verticalité des flancs (85.5° à 87.5°) a été mesurée sur des épaisseurs de 25 à 100  $\mu\text{m}$ .

La résine SU-8 récemment commercialisée a fait l'objet d'une étude afin d'établir les étapes du procédé de structuration, ainsi que ses caractéristiques optiques et mécaniques. Nous avons déterminé un coefficient d'atténuation de 4.54 [db/mm] à 365 nm, un module d'élasticité biaxial de 5.18 GPa et un coefficient de dilatation linéaire de 52 [ppm/°C]. La verticalité des flancs dépend de la dose d'illumination et dépasse les 89°. Des couches de 750 nm à plus de 2 mm ont été exposées en une seule fois et un facteur de forme de 18 a été obtenu. De telles performances n'avaient jamais pu être réalisées par aucune autre résine UV auparavant.

Un procédé spécifique permettant de pouvoir réaliser un électroformage dans des cavités comportant un relief intérieur métallisé a été mis au point. Par le dosage adéquat d'un agent nivelant (coumarine) dans la solution électrolytique (un bain de Watt de nickel), il a été démontré que le taux de croissance des parties hautes et profondes de la cavité est harmonisé afin d'obtenir un dépôt plan en surface.

Les techniques UV-LIGA développées dans ce mémoire ont trouvé, entre autres, un champ d'application dans le domaine de la micromécanique. Une roue flexible, dont la denture est liée à son centre par un ressort intégré ainsi qu'un rouage à plusieurs niveaux sont les principales réalisations obtenues par un électroformage dans des moules sacrificiels. Ces deux éléments ont servi dans un mécanisme à rattrapage de jeu et respectivement dans un microréducteur basé sur un micromoteur électrostatique rotatif.

Le moulage a été expérimenté avec succès par l'injection de rouages en plastiques de 1.4 mm de haut et de 3 mm de diamètre. Un micromoule a été conçu à cet effet en dupliquant par électroformage une pièce maîtresse en SU-8. Ces micro-rouages ont démontré leur fonctionnalité lors de leur montage dans un mouvement de montre à quartz. Tous les pas du procédé technologique UV-LIGA sont ainsi réalisés. Les principaux avantages de cette nouvelle méthode de fabrication de micromoules consistent en une amélioration du contrôle des tolérances et de la rugosité vis-à-vis des moules faits par l'électroérosion à fils, ainsi qu'à l'abaissement des frais de production par rapport à la méthode X-LIGA.

## Abstract

This study presents two techniques of structuration of type UV-LIGA (Lithographie, Galvanisierung und Abformung) based on the use of two thick photoresists which are a dry film resist called Riston<sup>®</sup> from DuPont and the new SU-8 negative-working resist from IBM. The relating processes to the structuration of these photoresists and some applications are presented too.

The minimal resolution of the Riston<sup>®</sup> films has been found to be 30  $\mu\text{m}$  for lines and trenches, and 40  $\mu\text{m}$  for isolated holes in a 50  $\mu\text{m}$ -thick film. A technique for the structuration of multilevel superimposed cavities has been set up. The verticality of the sidewalls (85.5°deg. to 87.5°deg) has been measured on film thicknesses between 25 and 100  $\mu\text{m}$ . The SU-8 process has been studied and is presented. Some optical and mechanical properties have been analysed. We have determined a coefficient of light attenuation of 5.18 [db/mm] at 365 nm, a coefficient of thermal expansion of 52 [ppm/°C] and a biaxial modulus of 5.18 GPa. The verticality of the walls depends on the exposure energy and has been found to be higher than 89°deg. Layers from 750 nm to 2 mm can be exposed in one time, which seems to be the state-of-the art for a UV-photoresist to our knowledge.

A specific process for the electroforming in multi-level superimposed cavities has been developed. With an adequate dosage of a levelling agent (coumarin) in the electrolytic Watt bath of nickel, a change in the growth rate of the high and the low level of the mold has been demonstrated. This rate is harmonised to obtain a flat deposition on the top surface of the formed structure.

The UV-LIGA techniques developed in this thesis have found applications in the field of the micromechanics. A flexible gearwheel, whose teeth are bound to the center via three integrated spring, and a multilevel gear system are the main realizations obtained by electroforming. These two structures have been used in a mechanism with a special watch mechanism and in a microreducer based on an electrostatic rotary micromotor.

We have experimented with success the plastic injection of a gear system having 1.4 mm in height and 3 mm in diameter. Its mold has been electroformed on a master in SU-8. These microparts have demonstrated their functionality and have been mounted in commercially-available-low-cost watches. All the process step of the LIGA technique have been established. The main advantages of this fabrication method are a better control of the tolerances and an improvement of the rugosity (against the wire electrodischarge machining technology). This technique is also cheaper and easier to start than X-LIGA.

---

## Table des matières

### Chapitre 1

<b>Introduction .....</b>	<b>5</b>
1.1 Contenu du travail.....	5
1.2 Motivations .....	5
1.3 Fabrication de composants micromécaniques .....	6
1.3.1 Techniques de structuration .....	6
1.3.1.1 Définition .....	7
1.3.1.2 Fabrication de pièces métalliques .....	7
1.3.1.3 Fabrication de pièces plastiques.....	8
1.4 Conclusion du chapitre .....	9
1.5 Références.....	10

### Chapitre 2

<b>Structuration de photorésists épais .....</b>	<b>13</b>
2.1 Introduction à la photolithographie .....	13
2.1.1 La photolithographie optique .....	13
2.1.2 Les trois modes d'exposition .....	14
2.1.3 La source UV .....	14
2.1.4 La résolution.....	15
2.1.5 Conclusion.....	17
2.2 Les photorésists en films .....	17
2.2.1 Principe de base.....	17
2.2.1.1 Motivations .....	18
2.2.1.2 Introduction technologique .....	18
2.2.1.3 Description du procédé de type UV-LIGA.....	19
2.2.2 Mesure du contraste et de l'absorption.....	20
2.2.3 Structuration de micromoules.....	21
2.2.3.1 Mesures dimensionnelles .....	23
2.2.3.2 Conclusion .....	24
2.2.4 Discussion du procédé .....	24
2.2.4.1 Facteurs limitant la résolution.....	24
2.2.4.2 Améliorations du procédé .....	25
2.2.4.3 Conclusion .....	26
2.2.5 Conclusion sur les films secs.....	27

2.3	La résine SU-8 .....	27
2.3.1	Historique des photorésists à base d'époxy .....	27
2.3.2	Fabrication du résist et mesure de viscosité .....	28
2.3.3	Réactions photochimiques induites dans la résine SU-8 .....	29
2.3.3.1	Choix du monomère .....	29
2.3.3.2	Photochimie du SU-8 .....	29
2.3.3.3	Conclusion .....	31
2.3.4	Caractéristiques optiques .....	31
2.3.4.1	Influence du photo-amorceur .....	31
2.3.4.2	Influence de l'optique de la machine d'exposition .....	32
2.3.4.3	Indice de réfraction du SU-8 réticulé .....	32
2.3.4.4	Approximation de l'épaisseur maximale exposable .....	34
2.3.4.5	Conclusion .....	35
2.3.5	Structuration du SU-8 .....	35
2.3.5.1	L'étalement de couche épaisses .....	36
2.3.5.2	La cuisson .....	38
2.3.5.3	Dose d'irradiation .....	39
2.3.5.4	Le recuit, le développement et la dissolution du SU-8 .....	39
2.3.6	Mesures mécaniques .....	41
2.3.6.1	Détermination expérimentale .....	41
2.3.6.2	Présentation des modèles théoriques .....	43
2.3.6.3	Vérification des modèles .....	43
2.3.6.4	La contrainte dans les films de SU-8 .....	44
2.3.6.5	Conclusion .....	45
2.3.7	Etude et détermination des paramètres d'exposition .....	46
2.3.7.1	Mesures du contraste et de la sensibilité .....	46
2.3.7.2	Détermination de la dose d'irradiation .....	47
2.3.7.3	Recherche de la résolution minimale du SU-8 .....	48
2.3.7.4	Facteurs limitatifs pour la résolution dans le SU-8 .....	49
2.3.7.5	Remarque finale .....	52
2.3.8	Conclusion sur la résine SU-8 .....	52
2.4	Conclusion du chapitre .....	53
2.5	Références .....	53

## Chapitre 3

<b>Electroformage dans des cavités multi-niveaux avec un agent nivelant .....</b>	<b>57</b>
3.1 Principe électrochimique .....	58
3.1.1 Principe de base .....	58
3.1.2 La réaction chimique .....	58
3.1.3 La solution galvanique .....	59
3.2 Discontinuités de la croissance électrolytique .....	59
3.2.1 La distribution de courant .....	59
3.2.2 La distribution primaire .....	60

3.2.3	Améliorations du procédé.....	61
3.3	Electroformage avec un agent nivelant.....	62
3.3.1	Principe de la méthode .....	62
3.3.2	Mécanisme de diffusion.....	63
3.3.3	Simulation de l'évolution du profil.....	64
3.3.3.1	Introduction.....	64
3.3.3.2	Le programme.....	64
3.3.3.3	Modélisation .....	65
3.3.4	Résultats .....	67
3.3.4.1	La structure testée .....	67
3.3.4.2	Résultats des simulations .....	67
3.3.4.3	Expérimentation.....	68
3.3.5	Conclusion.....	69
3.4	Conclusion du chapitre .....	69
3.5	Références.....	69

## Chapitre 4

<b>Réalisation de micropièces et de dispositifs .....</b>	<b>71</b>
4.1 Le microréducteur.....	71
4.1.1 Objectifs .....	72
4.1.2 Choix de l'actionneur .....	72
4.1.2.1 Théorie de base .....	72
4.1.2.2 Effet de la réduction de taille sur la densité d'énergie.....	72
4.1.2.3 Discussion .....	74
4.1.3 Modélisation.....	74
4.1.3.1 Modélisation d'un micromoteur électrostatique à champ axial	74
4.1.3.2 Application numérique.....	77
4.1.3.3 Remarques finales sur la modélisation .....	79
4.1.4 Fabrication du microréducteur.....	79
4.1.4.1 Reprise du couple.....	79
4.1.4.2 Microréducteur non-intégré .....	80
4.1.4.3 Fabrication des éléments du microréducteur .....	80
4.1.4.4 Résultats.....	82
4.1.4.5 Conclusion .....	83
4.1.5 Intégration du rouage et du rotor .....	84
4.1.5.1 Réduction de l'épaisseur des engrenages.....	84
4.1.5.2 Le démonstrateur à rotor rigide.....	84
4.1.5.3 Fabrication et assemblage du microréducteur.....	85
4.1.5.4 Tests et discussion.....	87
4.1.6 Conclusion.....	87
4.2 La roue flexible.....	88
4.2.1 Présentation du cahier des charges .....	88
4.2.1.1 Introduction.....	88
4.2.1.2 Le cahier des charges .....	88

---

4.2.2	Concept et modélisation .....	89
4.2.2.1	Etude théorique .....	89
4.2.2.2	Conception de la roue flexible .....	90
4.2.2.3	Choix de la technologie et du matériau.....	90
4.2.2.4	Dimensionnement de la roue flexible .....	92
4.2.2.5	Simulation numérique des contraintes .....	92
4.2.2.6	Conclusion .....	95
4.2.3	Détermination de la denture .....	95
4.2.3.1	Etat de l'art.....	95
4.2.3.2	Profils de denture retenus.....	95
4.2.3.3	Dessin et transposition des profils sur le masque .....	97
4.2.4	Réalisations pratiques .....	97
4.2.4.1	Dessin des masques.....	98
4.2.4.2	Fabrication des engrenages .....	98
4.2.4.3	Dispositif de mesure .....	100
4.2.4.4	Résultats et analyses .....	101
4.2.5	Remarques finales.....	102
4.3	Les micromoules.....	103
4.3.1	Introduction .....	103
4.3.2	Etat de l'art .....	104
4.3.3	Fabrication de micromoules .....	104
4.3.3.1	Procédé.....	104
4.3.3.2	Mesures et observations.....	106
4.3.3.3	Points forts de ce procédé .....	107
4.3.4	Extension du procédé : la microstéréolithographie .....	108
4.3.5	Conclusion.....	110
4.4	Conclusion du chapitre .....	110
4.5	Références.....	110

## Chapitre 5

Conclusion de la thèse .....	113
Annexe .....	115
Bibliographie.....	116
Currucilum Vitae.....	119