

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

FABRICATION ET INTÉGRATION D'UN MICROMOTEUR
ELECTROSTATIQUE AVEC UN SOC DANS UN MICROROBOT

OLIVIER-DON TRUONG
DÉPARTEMENT GÉNIE INFORMATIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)

Avril 2006



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-17968-0

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-17968-0

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

FABRICATION ET INTÉGRATION D'UN MICROMOTEUR
ELECTROSTATIQUE AVEC UN SOC DANS UN MICROROBOT

présenté par : TRUONG Olivier-Don

en vue de l'obtention du diplôme de : maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Mme. NICOLESCU Gabriela, Doct., présidente

M. MARTEL Sylvain, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. PETER, Yves-Alain, Ph.D., membre

Remerciements

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur de recherche, M. Sylvain Martel pour avoir accepté de diriger mes travaux dans le cadre du projet WalkingDie. Cette maîtrise m'a permis de découvrir de nouvelles passions qui sont la microfabrication et les microsystèmes. Je remercie aussi mon jury qui a accepté d'évaluer mon travail. J'aimerais aussi remercier :

Mon frère Sébastien, qui tous les jours, est une preuve de persévérance, de courage et une raison de vouloir continuer la recherche.

Mes parents pour m'avoir soutenu et encouragé tout au long de mes études.

Neila Kaou pour m'avoir guidé et aidé dans l'ÉNORME monde de la microfabrication.

Jean-Baptiste Mathieu pour son aide précieuse, ses qualités de chercheur et ses nombreuses heures de « bénévolat » dans le cours de microsystèmes.

Philippe Vasseur pour m'avoir aidé à développer mon procédé DRIE et pour tout son savoir faire dans les procédés de microfabrication. !!!Champagne!!!

Marie-Hélène Bernier et Olivier Grenier pour m'avoir facilité l'accès aux appareils en salle blanche et pour leur expertise en salle blanche.

Jacques-André Delafosse et Walder André pour m'avoir introduit au projet WalkingDie.

Alexandre Caron pour son travail sur la nouvelle structure du WalkingDie et son expertise en mécanique.

Pierre Pouponneau pour son aide dans la rédaction de ce mémoire et pour son réconfort tout les vendredis soir, à 17h15, pour un Ricard.

Dominic St-Jacques pour m'avoir laissé son bureau, son appartement et qui sait dans le futur...

Arnaud Chanu pour son aide dans le monde mystique de l'informatique et pour les quelques jours de colocation.

Ouajdi Felfoul pour me rappeler tous les jours que je suis encore jeune.

Charles Charbonneau-Tremblay pour son talent de « patenteux »

Samer Tamaz pour son calme et son esprit zen.

Marc-Antoine Fortin, Pascal Hannyoy, Martin Mankiewicz, Zhao Lu, Éric Aboussouan et Ramzi Bey Oueslati pour leur support moral, leur bonne humeur et leur joie de vivre (sauf Éric).

L'équipe du LMF qui m'a supporté tout au long de mon projet.

Résumé

Ce mémoire présente un nouveau *design* de micromoteurs électrostatique afin de déplacer un microrobot : le WalkingDie. L'objectif de ce projet est de miniaturiser le plus possible les dimensions des actionneurs afin d'obtenir le plus petit robot possible. Cette miniaturisation permet d'obtenir une plus grande densité de microrobots dans un espace de travail donné.

Une explication des micromoteurs électrostatiques et les équations du couple moteur sont décrites.

Des tests électriques ont été effectués sur une version préliminaire des micromoteurs électrostatiques produits avec le procédé MUMPs par micro-usinage de surface. Étant inopérants et difficile à intégrer, les micromoteurs produits avec cette technologie ne répondaient pas aux exigences du WalkingDie.

Une nouvelle structure du microrobot a été développée afin de concevoir les nouveaux types de micromoteur en fonction de leur intégration. Les méthodes d'intégration intéressantes pour ce projet sont l'assemblage avec un gabarit, des microvias pour les interconnexions électriques et des pièces monolithiques pour l'assemblage roue/rotor.

Une procédure complète de microfabrication a été développée afin de produire la nouvelle génération de micromoteurs électrostatiques. Cette procédure comprend les étapes suivantes : la photolithographie, la gravure DRIE, la libération et l'assemblage des morceaux.

Des tests électriques ont été effectués sur la nouvelle génération de micromoteurs. Une trop grande force de friction par capillarité entre le rotor et le stator est remarqué. Malgré tout, avec une légère vibration sur le porte échantillons, le micromoteur bouge avec une tension de 110V.

Abstract

This thesis presents a new design of electrostatic micromotor in order to move a microrobot: The WalkingDie. The aim of this project is to miniaturize the actuator dimensions as much as possible in order to obtain the smallest possible robot. This miniaturization gives a possibility to obtain a greater density of microrobots in a given workspace.

An explanation of the electrostatic micromotor and the equations of the micromotor torque are described.

Electrical tests were carried out on a preliminary version of the electrostatic micromotor produced with the MUMPs process by micromachining of the surface. Being inoperative and difficult to integrate, the electrostatic micromotor produced with this technology did not fulfill the requirements of the WalkingDie.

A new structure of the microrobot was developed in order to design new types of electrostatic micromotor. The new integration methods for this project include the assembly with a gig, microvias for the electrical interconnections and the monolithic piece for the assembly wheel/rotor.

A complete microfabrication procedure was developed in order to produce a new generation of electrostatic micromotors. This procedure includes the following stages: photolithography, DRIE etching, release and assembly of the parts.

Electrical tests were carried out on the new generation of electrostatic micromotors. Large force of friction by capillarity between the rotor and the stator was observed. Despite the friction, by applying slight vibration on the sample holder, the electrostatic micromotor moved with a tension of 110V.

Table des matières

Remerciements	iv
Résumé	vi
Abstract	vii
Table des matières	viii
Liste des tableaux	xiii
Liste des figures	xiv
Liste des figures	xiv
Liste des équations	xvii
Chapitre 1 : Introduction	1
Chapitre 2 : Étude Théorique	6
2.1 Introduction	6
2.2 Micromoteur électrostatique à capacité variable.....	6
2.3 Détermination du couple moteur électrostatique théorique	7
2.4 Conclusion.....	9
Chapitre3 : Design préliminaire du micromoteur	10
3.1 Introduction	10
3.2 Test sur IMUPMRPN de MEMSCAPs.....	10
3.3 Procédé de microfabrication MUMPs.....	10

3.4 Tests sur les micromoteurs électrostatiques	11
3.5 Problèmes d'intégration pour les micromoteurs MUMPs.....	15
3.6 Conclusion.....	16
 Chapitre 4 : Structure et intégration du WalkingDie	17
4.1 Introduction	17
4.2 Design du WalkingDie	17
4.2.1 Modèle préliminaire	17
4.2.2 Nouveau modèle	18
4.3 Contrôle du WalkingDie	19
4.3.1 Description du System on Chip (SoC).....	19
4.3.2 Séquence des signaux.....	20
4.4 Intégration	21
4.4.1 Assemblage du microrobot	21
4.4.1.1 Création d'un gabarit d'assemblage	21
4.4.1.2 Assemblage des pièces	22
4.4.2 Interconnexions électriques.....	24
4.4.2.1 Interconnexions avec un <i>wire bonder</i>	24
4.4.2.2 Microvia par procédé de microfabrication	25
4.4.3 Intégration des roues avec les micromoteurs	26
4.4.3.1 Par collage	26
4.4.3.2 Monolithique	26
4.5 Modèle du micromoteur électrostatique en fonction du design du WalkingDie	27
4.6 Conclusion.....	27
 Chapitre 5 : Fabrication et résultats expérimentaux.....	29
5.1 Introduction	29
5.2 Échantillons de travail.....	29
5.2.1 Échantillons de test	29
5.2.2 Échantillon pour la version finale	29

5.3 Nettoyage et déshydratation des échantillons	30
5.3.1 Description	30
5.3.1.1 Nettoyage des gaufres de silicium	30
5.3.1.2 Déshydratation des échantillons	30
5.3.2 Recette utilisée	31
5.4 Photolithographie	32
5.4.1 Description	32
5.4.2 Fonctionnement.....	32
5.4.3 Développement du <i>design</i> du masque de photolithographie	32
5.4.3.1 Utilisation du masque pour la photolithographie	32
5.4.3.2 Description du masque de lithographie	34
5.4.3.3 Les moteurs électrostatiques (rotor et stator)	35
5.4.3.4 Les pointes de flottement.....	36
5.4.3.5 Les plages d'alignements	37
5.4.3.6 Les motifs de contrôle de la qualité des procédés	40
5.4.3.7 Les matrices de trous pour les vias d'interconnexions.....	41
5.4.4 Développement du procédé de dépôt de la photorésine	42
5.4.4.1 Méthode de dépôt de la photorésine	42
5.4.4.2 Résine S1813	43
5.4.4.3 Résine SPR220-7.0.....	44
5.4.4.4 Photorésine utilisé	45
5.4.4.5 Soft bake de la résine.....	45
5.4.5 Développement de procédé pour l'insolation	46
5.4.5.1 Méthode d'utilisation de l'aligneuse de masque	46
5.4.5.2 Temps d'insolation	47
5.4.6 Développement du procédé pour le développement	47
5.4.6.1 Développement.....	47
5.4.6.2 Temps de développement	47
5.4.6.3 Recuit de la résine	48
5.4.4 Recette utilisée	48

5.5 Gravure physico-chimique	51
5.5.1 Technique de gravure.....	51
5.5.1.1 RIE.....	51
5.5.1.2 DRIE.....	51
5.5.2 Types de gravure DRIE.....	52
5.5.2.1 Gravure CRYO.....	52
5.5.2.2 Gravure Bosch.....	53
5.5.2.3 Écran de contrôle de l'ICP	54
5.5.3 Développement du procédé.....	55
5.5.3.1 Influence du conditionnement de la chambre.....	55
5.5.3.2 Temps de passivation vs temps de gravure	56
5.5.3.3 Influence de la pression.....	56
5.5.3.4 Influence de la quantité de gaz	57
5.5.3.5 Influence de l'hélium au dos de la plaque	58
5.5.3.6 Influence de la puissance ICP.....	58
5.5.3.7 Influence <i>Bias Voltage</i>	58
5.5.3.8 Surface à graver sur l'échantillon.....	59
5.5.4 Recette utilisée	59
5.6 Décollage de la résine	60
5.6.1 Description.....	60
5.6.2 Fonctionnement.....	60
5.6.3 Recette utilisée	60
5.7 Gravure Chimique de l'oxyde de silicium	61
5.7.1 Description.....	61
5.7.2 Fonctionnement.....	61
5.7.3 Développement de procédé.....	61
5.7.3.1 Mélange utilisé	61
5.7.3.2 Temps de gravure du SiO ₂	62
5.7.4 Recette utilisée	62
5.8 Manipulation pour l'assemblage du micromoteur	63

5.8.1 Description	63
5.8.2 Fonctionnement.....	63
5.8.3 Assemblage	64
5.9 Conclusion.....	65
Chapitre 6 : Résultat.....	66
6.1 Microfabrication des micromoteurs électrostatiques	66
6.2 Tests sur les nouveaux micromoteurs électrostatiques	67
6.2.1 Montage expérimental	67
6.2.2 Résultats des tests électriques.....	67
Discussion	71
Conclusion.....	72
Références	73

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Procédé MUMPs	11
Tableau 3.2 : Tableau des test électrique sur la série IMUPMRPN.....	14
Tableau 5.1 : Caractéristiques de la SOI	30
Tableau 5.2 : Descriptions des moteurs électrostatiques.....	36

Liste des figures

Figure 2.1 : Moteur électrostatique side-drive	7
Figure 2.2 : Moteur électrostatique top-drive.....	7
Figure 2.3 : Modèle des 2 plaques parallèles [19].....	8
Figure 3.1 : Source de tension DC	12
Figure 3.2 : Station de test.....	12
Figure 3.3 : Micromoteurs électrostatiques à force side-drive MUMPs	13
Figure 3.4 : Micromoteurs électrostatiques à force top-drive MUMPs	13
Figure 3.5 : Court circuit palme/rotor	14
Figure 3.6 : Pointe de flottement (dimple)	15
Figure 3.7 : palmes du rotor non uniforme.....	16
Figure 4.1 : Design conceptuel du WalkingDie [21]	17
Figure 4.2 : Nouveau modèle du WalkingDie.....	19
Figure 4.3 : Plancher d'alimentation du WalkingDie	19
Figure 4.4 : SoC du WalkingDie [23]	20
Figure 4.5 : Dessin CAD du micromoteur électrostatique	21
Figure 4.6 : Séquence pour la direction de déplacement.....	21
Figure 4.7 : Gabarit d'assemblage	22
Figure 4.8 : SoC et les pièces fictives du WalkingDie.....	23
Figure 4.9 : Assemblage des pièces dans le gabarit	24
Figure 4.10 : WalkingDie fictif sur un 10 cents canadien.....	24
Figure 4.11 : Wire bonder [24].....	25
Figure 4.12 : Microvia par DRIE [25].....	26
Figure 4.13 : Intégration monolithique rotor/roue	27
Figure 5.1 : Ondulations sur les flancs de gravure.....	33
Figure 5.2 : Ondulations sur le masque de photolithographie.....	33
Figure 5.3 : Cercle sur le masque de photolithographie.....	33
Figure 5.4 : Flancs de gravure sans ondulations avec le masque de quartz	34
Figure 5.5 : Gravure de cercles avec le masque de quartz	34

Figure 5.6 : Partie WalkingDie sur le masque PolyLu.....	35
Figure 5.7 : Description des moteurs électrostatiques pour le Tableau 5.2	36
Figure 5.8 : Pointe de flottement (dimple)	37
Figure 5.9 : Plages d'alignement sur le masque	38
Figure 5.10 : Support d'alignement.....	38
Figure 5.11 : Croix d'alignement	38
Figure 5.12 : Alignement de la croix avec le support	39
Figure 5.13 : Zoom sur une ailette lors de l'alignement.....	40
Figure 5.14 : Motifs de contrôle de la qualité	41
Figure 5.15 : Répartition des motifs de contrôle de la qualité	41
Figure 5.16 : Matrices de trous et de traces.....	42
Figure 5.17 : Tournette Laurell WS-200-4NPP/RTV	43
Figure 5.18 : Table d'étalement de la photorésine S1813 [28].....	44
Figure 5.19 : Table d'étalement de la photorésine SPR220 [29].....	45
Figure 5.20 : L'aligneuse de masque M4 Karl Suss	46
Figure 5.21 : Photorésine évasée lors d'un recuit de la SPR220	48
Figure 5.22 : Procédé de gravure RIE [30]	51
Figure 5.23 : Procédé de gravure DRIE [31]	52
Figure 5.24 : Succession de gravure et de passivation [34]	54
Figure 5.25 : Scalloping lors d'une gravure.....	54
Figure 5.26 : Chambre de gravure sale	55
Figure 5.27 : Chambre de gravure propre	56
Figure 5.28 : Gravure à une pression de 30mTorr	57
Figure 5.29 : Gravure à une pression de 20mTorr	57
Figure 5.30 : micropositionneur avec la pointe de verre.....	64
Figure 5.31 : Microscope A-Zoom2.....	64
Figure 5.32 : Assemblage final du micromoteur électrostatique	65
Figure 6.1 : Flancs de gravure du modèle 4.3	66
Figure 6.2 : Schéma du montage de test.....	67
Figure 6.3 : État initiale du modèle 4.3	68

Figure 6.4 : Claquage électrique du modèle 4.3.....	68
Figure 6.5 : Modèle 4.3 brûlé.....	69
Figure 6.6 : État initiale du modèle 3.3	69
Figure 6.7 : Mouvement d'un pas dans le sens horaire.....	70

Liste des équations

Équation 2.1	8
Équation 2.2	8
Équation 2.3	8
Équation 2.4	8
Équation 2.5	9
Équation 2.6	9
Équation 2.7	9

Chapitre 1 : Introduction

Le concept d'utilisation des robots miniatures pour des opérations au niveau moléculaire est la motivation principale du projet WalkingDie [1]. L'objectif de ce projet est d'augmenter la densité de robots capables de travailler à l'échelle nanométrique en réduisant le volume du robot. Les principales contraintes sont la miniaturisation du microrobot et l'intégration des pièces à l'échelle micrométrique. La principale limite de miniaturisation du WalkingDie est déterminée par le choix judicieux de l'actionneur de déplacement.

Les actionneurs thermiques fonctionnent par une dilatation thermique d'un matériau. Les plus populaires sont les actionneurs thermiques bimorphe. Il s'agit d'une structure où l'on retrouve une couche conductrice, qui aura comme rôle de chauffer, prise en sandwich entre 2 couches de matériaux ayant un haut facteur de dilatation thermique. La vitesse d'exécution d'un actionneur thermique ainsi que le temps de retour à l'état initial sont très lents. Les actionneurs thermiques possèdent l'avantage de développer une grande force et un grand couple avec un faible voltage. Cependant, ils ont besoins d'une haute source de courant. Ce haut courant est acheminé par des fils conducteurs connectés à une source extérieure. Le Walking Silicon [2] utilise des actionneurs thermiques. Ce microrobot monolithique est fabriqué uniquement par des procédés de microfabrication. Son système de locomotion est composé de pattes en silicium qui peuvent bouger grâce à un changement thermique des articulations faites en polyamide. Il est relié par des fils électriques à une source de courant externe. On déduit, par les contraintes du projet, que ce type d'actionneurs n'est pas approprié au projet WalkingDie à cause de l'obligation d'avoir des connexions par fil pour la source de courant.

Les actionneurs biologiques, qui sont les plus efficaces et les plus versatiles, sont des microorganismes vivants. De plus, ils sont polyvalents dans leur fonction, auto

assemblés, à faible coût, disponible facilement, et souvent à l'échelle nanométrique. Ces actionneurs n'ont pas besoin d'une alimentation électrique pour être activés mais plutôt une alimentation chimique. La durée de vie et l'efficacité de ce type d'actionneur sont très sensibles à la qualité de l'environnement. Cependant, les méthodes de contrôle des actionneurs biologiques ne sont pas très bien maîtrisées. Il existe 3 classes majeures d'actionneurs biologiques : *cytosquelette/microtubule* qui agit par le contrôle de la forme et des organelles par la cellule, *flagelle* qui agit par la propulsion des cellules, *musculaire* qui fonctionne par la contraction des cellules par un stimulus externe [3]. Le microrobot musculaire organique [4] utilise des cellules cardiaques comme un actionneur biologique. Contrairement aux autres types de microrobots, il est alimenté en grande partie par du glucose. La contraction des cellules cardiaques de ce microrobot produit une force d'environ 14 mN. Avec cette force, le microrobot n'a aucune difficulté à contrer la force de traînée de Stokes valide à faible nombre de Reynold. Un des grands problèmes de ce type d'actionneurs est que les impulsions musculaires ne sont ni prévisibles ni répétables. On déduit, par les contraintes du projet, que ce type d'actionneurs n'est pas approprié au projet WalkingDie pour lequel un actionneur répétable et une alimentation électrique sont souhaités.

Les actionneurs électromagnétiques fonctionnent de manière à ce que lorsqu'un courant électrique passe dans un matériau conducteur qui est situé dans un champ magnétique, ce matériau subit une force électromagnétique (Force de Lorentz) en s'alignant avec le champ magnétique. Les actionneurs électromagnétiques sont contrôlés par l'application d'un courant électrique. À grande échelle, les actionneurs électromagnétiques ont l'avantage de créer de plus grandes forces que les actionneurs électrostatiques et piézoélectriques. À petite échelle, à cause de la miniaturisation des bobines, les pertes d'énergie par effet Joule augmentent la température de l'actionneur de façon importante à cause de l'augmentation de la densité courant/surface [5]. Il est à noter que ces actionneurs ont souvent des dimensions supérieures au millimètre. Sous cette dimension, leur intégration et leur miniaturisation représentent des défis

technologiques. Plusieurs microrobots ont été construits avec des micromoteurs électromagnétiques [6,7]. Le Pollicino [8] utilise des micromoteurs électromagnétiques de type Wobble pour se déplacer. Ces micromoteurs, d'un diamètre de 8mm, fournissent un couple moteur de $350\mu\text{Nm}$. Ce microrobot est contrôlé par une manette externe qui est reliée directement au microrobot à l'aide de fils de $25\mu\text{m}$ de diamètre. On déduit, par les contraintes du projet, que ce type d'actionneurs n'est pas approprié au projet WalkingDie du fait que la dimension des micromoteurs est trop grande et que le courant est acheminé par fil d'une source de courant externe.

Les actionneurs piézoélectriques fonctionnent par déformation du réseau cristallin d'un matériau à l'application d'une charge électrique. Les actionneurs piézoélectriques ont l'avantage d'avoir une très grande efficacité au niveau de la quantité de force émise pour une tension donnée mais cette grande force est exercée sur un petit déplacement. Afin d'obtenir des vitesses efficaces, il faut opérer les actionneurs piézoélectriques à haute fréquence. Cependant, il est difficile d'intégrer directement des actionneurs piézoélectrique avec des procédés CMOS car la déposition d'une couche de zirconium titanate (PZT) se fait à haute température et peut endommager les couches métalliques d'aluminium du procédé [9]. Plusieurs microrobots ont été construits avec des actionneurs piézoélectriques [10,11]. Ces microrobots ont des dimensions beaucoup plus élevées que celles espérées pour le WalkingDie. Le microrobot I-swarm [12,13] respecte les dimensions espérées mais ce microrobot, très prometteur, est encore au stade préliminaire et plusieurs problèmes dont l'alimentation sont soulevés. On déduit, par les contraintes du projet, que ce type d'actionneurs n'est pas approprié au projet WalkingDie car l'intégration avec les circuits CMOS est plus complexe. De plus, les dimensions des actionneurs piézoélectriques nous incitent à ne pas utiliser ce mode d'activation.

Les actionneurs électrostatiques fonctionnent lorsqu'un matériau est chargé électriquement et exerce une force attractive sur un autre objet qui possède une charge

opposée ou une force répulsive sur un objet qui possède le même type de charge [14]. Les actionneurs électrostatiques ont la capacité d'exécuter leurs opérations avec une grande rapidité. Ils ont aussi l'avantage d'être facilement intégrable de façon directe avec les circuits CMOS (sur un même substrat) ce qui l'avantage par rapport aux autres types d'actionneurs. Les actionneurs électrostatiques consomment peu de puissance à cause de leur faible consommation de courant. De plus, ils ne sont pas influencés par les variations de température. Les actionneurs électrostatiques sont contrôlés par l'application d'un voltage. Cependant, ces actionneurs possèdent une faible force de déplacement et un faible couple. Ce désavantage nécessite souvent une source de tension élevée afin d'obtenir les forces ou les couples voulus. Cette source de tension élevée est souvent un inconvénient majeur dans la conception d'un microsystème électrostatique. Peu de microrobots utilisent les actionneurs électrostatiques [15]. Ceci s'explique par la dimension des autres microrobots qui sont au dessus du millimètre. Au dessus du millimètre, il est beaucoup plus avantageux de prendre d'autres types actionneurs. Sous le millimètre, les actionneurs électrostatiques sont efficaces et intégrable avec les procédés CMOS. Le problème majeur de ce type d'actionneurs est le faible couple moteur développé. Pour le projet WalkingDie, l'actionneur électrostatique est celui qui convient le plus aux objectifs du projet. Par contre, la couple moteur devra être amélioré.

Plusieurs micromoteurs électrostatiques ont été fabriqués avec des procédés de microfabrication en surface [16]. Ces micromoteurs sont bien connus pour leur faible force développée dû au faible recouvrement de surface entre le rotor et le stator. Peu de moteurs sont produits avec des procédés de microfabrication de type *Bulkmachining* [17]. Ce procédé permet d'obtenir une plus grande surface de recouvrement entre le rotor et le stator et ainsi développer un plus grand couple moteur. C'est ce type de micromoteur électrostatique qui sera utilisé pour le WalkingDie.

Ce mémoire présente une étude théorique des micromoteurs électrostatiques, les tests électriques sur la version précédente des micromoteurs, la structure du WalkingDie en

fonction des méthodes d'intégration des micromoteurs électrostatiques, la méthodologie de microfabrication des micromoteurs et les tests électriques de la nouvelle version des micromoteurs électrostatiques.

Chapitre 2 : Étude Théorique

2.1 Introduction

Ce chapitre présente une description des micromoteurs électrostatiques à capacité variable et décrit le couple moteur de façon analytique.

2.2 Micromoteur électrostatique à capacité variable

Un micromoteur électrostatique est activé lorsque le rotor et le stator possèdent une charge électrique différente l'un de l'autre. Il se produit alors un mouvement qui tend à minimiser l'énergie du système en alignant le rotor avec le stator. Ce type de micromoteur est fabriqué avec des procédés de microfabrication similaires à ceux des circuits intégrés. Ceci permet leur miniaturisation et facilite leur intégration avec des circuits de contrôle de type CMOS. Les micromoteurs électrostatiques se caractérisent par leur excellente vitesse de rotation et un couple moteur produit souvent faible. Contrairement aux micromoteurs électromagnétiques, les micromoteurs électrostatiques fonctionnent à haut voltage et à faible courant. Le choix de l'environnement est important car le couple moteur développé par l'actionneur est fonction de la perméabilité relative du gaz ou du matériau entre le rotor et le stator. Grâce à l'homogénéité des matériaux du rotor et du stator, la majorité des micromoteurs électrostatiques est de type monolithique. Une structure monolithique réduit les étapes de fabrications et d'assemblage. Il existe très peu de version de micromoteur où le rotor et le stator sont fait en partie séparée et ensuite assemblé [18]. On peut exploiter la force électrostatique de 2 manières : *side-drive* et *top-drive*. La manière *side-drive* (Figure 2.1) implique un couple moteur électrostatique par l'alignement de la face du côté des palmes du rotor avec la face du côté des électrodes du stator. La manière *top-drive* (Figure 2.2) implique un couple moteur électrostatique par l'alignement entre la face du dessous des palmes du rotor avec la face du dessus des électrodes du stator (Minotti, p120).

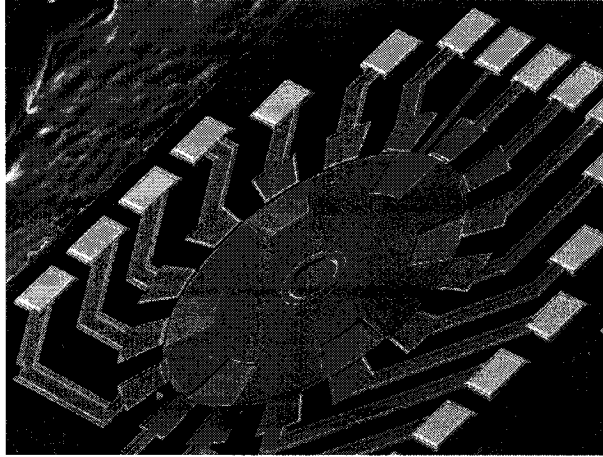


Figure 2.1 : Moteur électrostatique side-drive

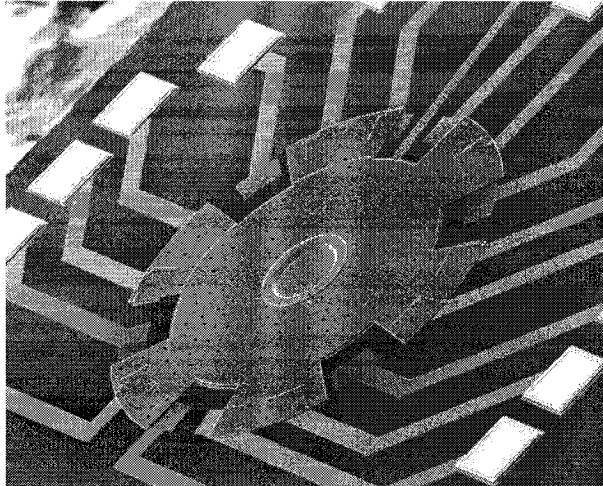


Figure 2.2 : Moteur électrostatique top-drive

2.3 Détermination du couple moteur électrostatique théorique

Afin de calculer le couple développé par un moteur électrostatique [19], le moteur électrostatique est modélisé par 2 plaques parallèles où d est la distance entre les 2 plaques, y est le recouvrement entre les 2 plaques sur l'axe des Y , b la hauteur de recouvrement des 2 plaques, ϵ la permittivité du vide et ϵ_0 la permittivité relative. Comme démontré dans l'Équation 2.1, on exprime la capacité du condensateur en fonction d'un décalage sur l'axe des Y .

$$C(y) = \frac{by\epsilon\epsilon_0}{d} \quad \text{Équation 2.1}$$

La charge électrique (Q_C) ainsi obtenue dans le condensateur est définie dans l'Équation 2.2 où la tension est représentée par V .

$$Q_C = C(y)V \quad \text{Équation 2.2}$$

L'énergie (E_C) emmagasinée dans une capacitance est définie dans l'Équation 2.3.

$$E_C = Q_C * V = \frac{by\epsilon\epsilon_0}{2d} V^2 \quad \text{Équation 2.3}$$

La Figure 2.3 représente un schéma d'un condensateur relié à une source de tension. On compare ce schéma à une palme du rotor alignée avec une électrode du stator du moteur électrostatique.

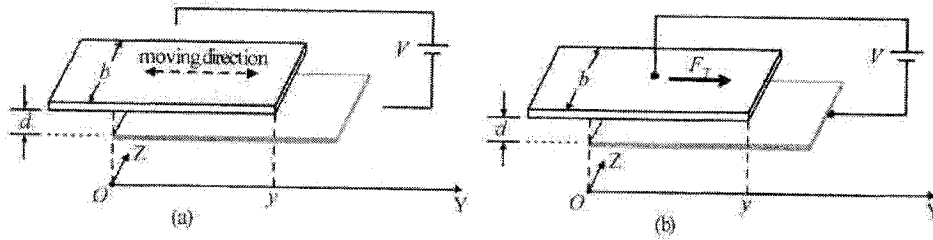


Figure 2.3 : Modèle des 2 plaques parallèles [19]

Dans l'Équation 2.4, on retrouve l'énergie réduite (E_B) de la source de tension une fois la source connectée à la capacitance. E_0 représente l'énergie initiale de la source de tension avant d'être connectée à la capacitance.

$$E_B = E_0 - Q_C V = E_0 - C(y)V^2 \quad \text{Équation 2.4}$$

L'Équation 2.5 nous démontre que l'énergie globale du système batterie-capacitance est la somme de l'énergie réduite de la source de tension et de l'énergie emmagasinée dans la capacitance.

$$E(y) = E_B + E_C = E_0 - \frac{1}{2} C(y) V^2 = E_0 - \frac{by\epsilon\epsilon_0}{2d} V^2 \quad \text{Équation 2.5}$$

On obtient la force tangentielle à partir de l'Équation 2.6 .

$$F_T = -\frac{\partial E(y)}{\partial y} = \frac{b\epsilon\epsilon_0}{2d} V^2 \quad \text{Équation 2.6}$$

Une fois la force tangentielle trouvée, on calcule le couple moteur en multipliant la force tangentielle par son bras de levier (Équation 2.7).

$$C_M = F_T * R_{rotor} \quad \text{Équation 2.7}$$

2.4 Conclusion

Ce chapitre a permis d'identifier les paramètres influençant le comportement d'un micromoteur électrostatique. C'est à partir de ces informations que nous allons élaborer un micromoteur visant à faire déplacer le WalkingDie.

Chapitre3 : Design préliminaire du micromoteur

3.1 Introduction

Des travaux antérieurs à ce mémoire sur des micromoteurs ont été effectués. Des micromoteurs électrostatiques ont été fabriqués avec le procédé de microfabrication **Multi-User MEMS Processes (MUMPs)** [20]. Ce chapitre présente les tests effectués sur ces micromoteurs de la série IMUPMRPN. Il décrit aussi le banc de test utilisé à cet effet.

3.2 Test sur IMUPMRPN de MEMSCAPs

Le test des moteurs électrostatiques de Jacques André Delafosse [21] était primordial afin de savoir si les micromoteurs électrostatiques fabriqués avec le procédé MUMPs pouvaient fournir assez de puissance afin de faire avancer le WalkingDie. Il est important que l'intégration des micromoteurs électrostatiques soit réalisable dans les contraintes du WalkingDie. Deux modèles de micromoteurs ont été produits lors de la *run* IMUPMRPN : Micromoteur électrostatique à force *side-drive* et micromoteur électrostatique à force *top-drive*.

3.3 Procédé de microfabrication MUMPs

Le procédé de microfabrication MUMPs fut développé en 1992 par un groupe de recherche américain. Ce projet, subventionné par Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), avait comme but de standardiser un procédé de microfabrication de surface afin de produire des microsystèmes à faible coût et rapidement implantables sur le marché. Ce procédé est accessible au domaine industriel, gouvernemental et éducationnel. La standardisation des étapes de microfabrication du procédé MUMPs a pour but de rendre la fabrication de microsystèmes accessible à des professionnels ayant une expérience limitée en microfabrication. Ce procédé comprend trois couches de

polysilicones, deux couches d'oxyde sacrificielles, une couche isolante de nitrure et une couche de métal pour les interconnexions. Le Tableau 3.1 montre l'ordre, le matériau et l'épaisseur des couches minces du procédé de microfabrication MUMPs. Ce procédé se termine avec une libération des structures en gravant les couches d'oxyde chimiquement à l'acide hydrofluoridrique (HF) 49%. Ce procédé est limité par des règles de conception qui sont déterminées par la résolution et la précision de l'alignement du système de lithographie. La recherche effectuée pour le développement de ce procédé a permis le lancement d'une nouvelle compagnie au nom de MEMsCAP. Cette compagnie offre la possibilité de produire n'importe quel design de microsystèmes qui respecte le procédé MUMPs.

Tableau 3.1 : Procédé MUMPs

N° de la couche	Matériau de la couche	Épaisseur
1	Nitrure	0,60 μm
2	Polysilicone 0	0,50 μm
3	Oxyde 1	2,00 μm
4	Polysilicone 1	2,00 μm
5	Oxyde 2	0,75 μm
6	Polysilicone 2	1,50 μm
7	Metal (Or)	0,50 μm

3.4 Tests sur les micromoteurs électrostatiques

Les micromoteurs électrostatiques de la série IMUPMRPN ont été testés avec un générateur de tension DC modèle Harrison 6521A DC Power Supply (Figure 3.1) et une station de test de la compagnie Microzoom (Figure 3.2). La station de test est constituée de cinq pointes de test de tungstène qui peuvent être déplacées selon les axes X , Y et Z à l'aide de vis micrométriques. Le premier test effectué sur les micromoteurs électrostatiques avait pour but de démontrer que les rotors étaient bien libérés des stators. Un des problèmes majeurs de la série précédente (IMUPMRPM) était que les rotors étaient difficilement libérés ce qui empêchait le mouvement du rotor. En réponse

à ce problème, nous avons effectué un test purement mécanique en utilisant une pointe de test afin de pousser sur le rotor. Ces tests ont permis de montrer que les rotors des micromoteurs électrostatiques à force *top-drive* et les rotors des micromoteurs électrostatiques à force *top-drive* de la série IMUPMRPN étaient bien libérés. Ce type de test endommage souvent le microsystème en laissant des traces de tungstène sur le rotor ou la surface du stator. Ces traces proviennent des pointes de test en tungstène.



Figure 3.1 : Source de tension DC



Figure 3.2 : Station de test

Suite au test mécanique des micromoteurs électrostatiques, le test électrique était primordial. Les tests ont été effectués sur les deux types de micromoteurs électrostatiques de la série IMUPMRPN : Micromoteurs électrostatiques à force *side-drive* MUMPs

(Figure 3.3) et micromoteurs électrostatiques à force *top-drive* MUMPs (Figure 3.4). Pour chacun des micromoteurs électrostatiques, quatre pointes de test ont été utilisées pour l'alimentation des électrodes et une pointe de test est utilisée afin de produire la mise à la terre du rotor. Les résultats des tests électriques sur les deux types de micromoteur électrostatique sont démontrés dans le Tableau 3.2.

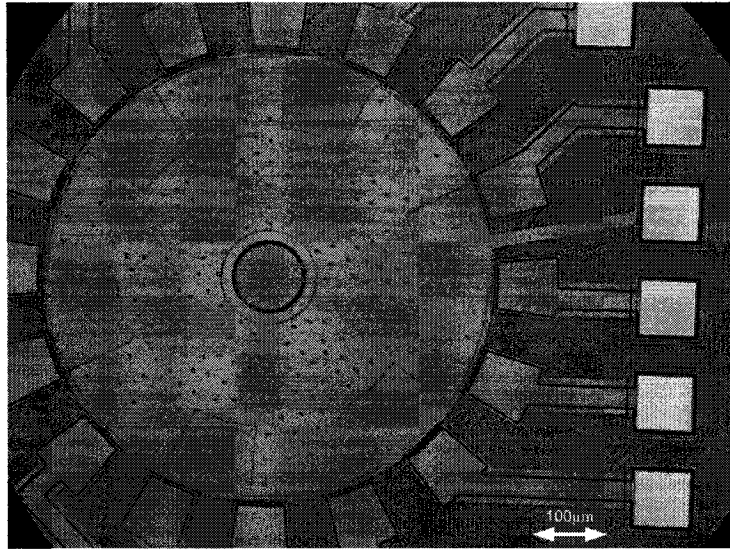


Figure 3.3 : Micromoteurs électrostatiques à force side-drive MUMPs

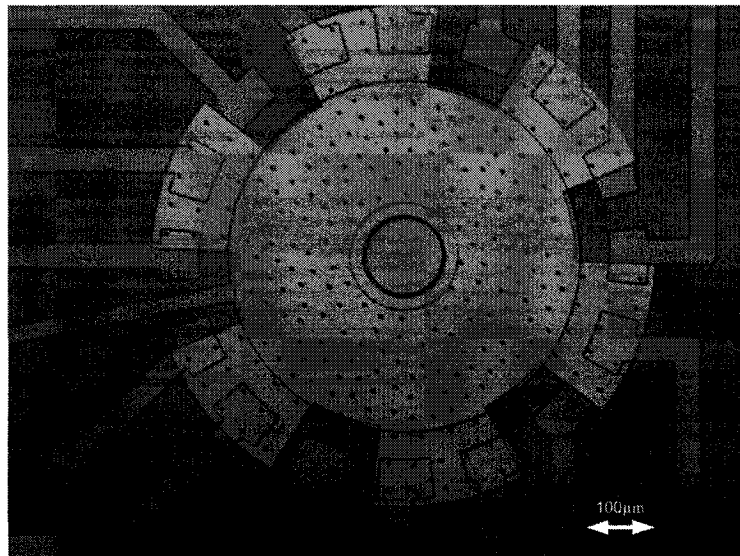


Figure 3.4 : Micromoteurs électrostatiques à force top-drive MUMPs

Tableau 3.2 : Tableau des test électrique sur la série IMUPMRPN

Tests électriques sur les micromoteurs électrostatiques de la série IMUPMRPN			
Micromoteur électrostatique à force <i>side-drive</i>		Micromoteur électrostatique à force <i>top-drive</i>	
Tension (Volt)	Comportement	Tension (Volt)	Comportement
50	Aucune réaction	50	Aucune réaction
90	Aucune réaction	80	Aucune réaction
160	Aucune réaction	110	Court circuit
240	Aucune réaction		
300	Aucune réaction		
390	Aucune réaction		
420	Court circuit		

On constate que le micromoteur électrostatique à force *side-drive* n'a jamais bougé et cela jusqu'à un voltage de 420V. À cause du haut voltage, on suppose qu'il y a eu un claquage électrique dans l'air entre l'électrode et la palme du rotor. Le micromoteur électrostatique à force *top-drive* a produit un court circuit entre la palme du rotor et l'électrode après 110V. La palme du rotor a agit comme un porte à faux (*cantilever*) au dessus de l'électrode et a produit ce court circuit (Figure 3.5). Ce court circuit a provoqué une soudure à arc entre la palme du rotor et une électrode du stator. Ceci démontre que les forces normales sont plus importantes que les forces tangentiellles. Ces résultats démontrent que les 2 types de micromoteurs sont inopérants.

**Figure 3.5 : Court circuit palme/rotor**

3.5 Problèmes d'intégration pour les micromoteurs MUMPs

Plusieurs problèmes s'imposent pour l'intégration des micromoteurs de la série IMUPMRPN avec la structure globale du WalkingDie. L'intégration d'une roue sur un des 2 modèles de la série IMUPMRPN de micromoteur est impossible. Cette intégration nécessiterait de coller une roue conductrice d'une dimension de 3mm de diamètre avec une épaisseur de 100 μ m sur un rotor ayant un diamètre de 600 μ m avec une épaisseur de 3,5 μ m. Il est à noter que le rotor est soutenu par de fines pointes appelées *dimples* (Figure 3.6) afin de minimiser les forces de frottement et de capillarité entre le rotor et la base du stator. Ces fines pointes ne pourraient pas résister à l'intégration par collage ou par fusion d'une roue sur le rotor à cause d'une trop grande pression de la roue sur le rotor et ses fines pointes. De plus, la non uniformité des palmes du rotor (Figure 3.7) pourrait causer des problèmes d'homogénéité de la force tangentielle du moteur électrostatique.

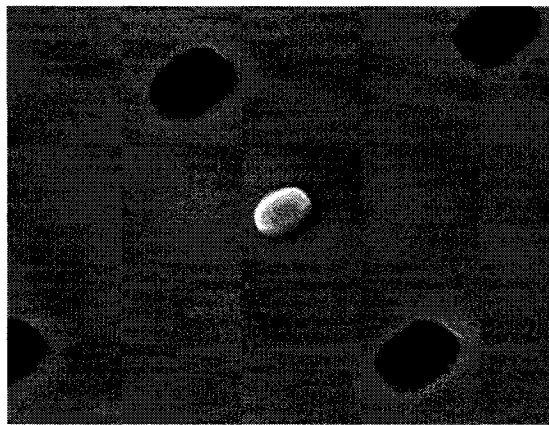


Figure 3.6 : Pointe de flottement (dimple)

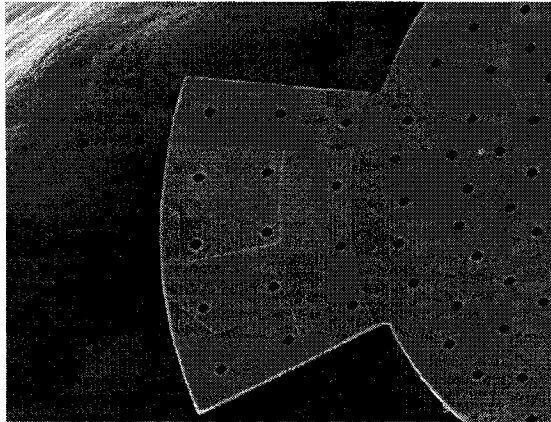


Figure 3.7 : palmes du rotor non uniforme

L'assemblage des pièces du WalkingDie est un autre problème des micromoteurs de la série IMUPMRPN. Afin d'obtenir un bon assemblage, il faut produire des motifs d'alignement d'assemblage sur les pièces. Sur les micromoteurs de la série IMUPMRPN, la fragilité du rotor ne nous permet pas d'exploiter la face arrière du micromoteur pour y ajouter des interconnexions ou des motifs d'alignement. Un autre problème majeur est l'interconnexion électrique entre les micromoteurs électrostatiques et le circuit de contrôle SoC du WalkingDie. En recevant le micromoteur électrostatique de la *Canadian Microelectronic Corporation* (CMC), il est très difficile de produire des modifications directement sur le die à cause de sa fragilité et de la structure 3-D du WalkingDie qui ne permet pas d'avoir recours au *wire bonding* qui est une technique d'interconnexion 2-D.

3.6 Conclusion

La première série de micromoteurs réalisée par notre laboratoire nous a permis de découvrir le monde de la miniaturisation avec l'utilisation de technologies établies comme le procédé MUMPs fourni par la CMC. Cette technologie ne répondait pas aux exigences des microrobots. Cela nous a permis de mieux comprendre les micromoteurs électrostatiques et de développer un banc de test électrique. Ces résultats nous amènent à élaborer un design plus efficace.

Chapitre 4 : Structure et intégration du WalkingDie

4.1 Introduction

Ce chapitre décrit le design, les différents éléments d'intégration et la nouvelle génération de moteur électrostatique pour le WalkingDie.

4.2 Design du WalkingDie

4.2.1 Modèle préliminaire

Le modèle du WalkingDie, avant l'été 2004, était un design conceptuel. Le squelette du WalkingDie devait être un substrat de silicium en forme de U. Il était fait de telle sorte que le circuit intégré SoC soit produit sur le même substrat qu'un des moteurs électrostatiques. L'autre moteur devait être relié par des connexions électriques directement sur le silicium. Les roues devaient être les plus minces et les plus légers possibles afin que le poids du WalkingDie soit à son minimum. Cependant, en regardant la Figure 4.1, on réalise que ce modèle conceptuel de microrobot est difficile à produire avec les technologies existantes.

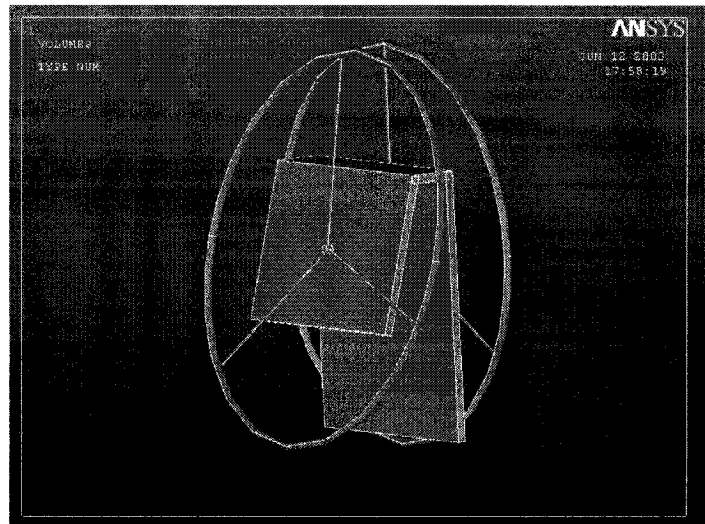


Figure 4.1 : Design conceptuel du WalkingDie [21]

4.2.2 Nouveau modèle

Le nouveau modèle du WalkingDie (Figure 4.2), a été produit en collaboration avec Alexandre Caron [22], un étudiant stagiaire en génie mécanique pendant l'été 2005. Ce nouveau modèle constitue une base de travail qui sera améliorée et modifiée en fonction des difficultés rencontrées. L'élaboration de ce nouveau modèle, d'une dimension d'environ $2 \times 2 \times 2\text{mm}^3$, a été réalisée en fonction des restrictions des méthodes d'intégration et de microfabrication existantes. Ce modèle garantit, en tout temps, l'alimentation, la communication et la synchronisation du SoC avec le plancher d'alimentation (Figure 4.3). Le nouveau modèle a été optimisé en fonction du couple moteur disponible afin de contrer le poids et la friction du WalkingDie et de pouvoir le déplacer. Le SoC a été positionné au milieu de la structure. Ce IC a été positionné le plus bas possible afin de simplifier ses connexions avec le plancher d'alimentation. Des petits bras sont utilisés afin de stabiliser le microrobot et d'éviter qu'il oscille lors de son accélération ou lors d'un arrêt. Ils servent aussi de jonction d'alimentation avec le plancher. Un oscillement pourrait causer des interruptions électriques entre le SoC et le plancher d'alimentation. Le SoC et les petits bras sont sur une base d'aluminium afin que l'assemblage des microsystemes dans le robot soit plus facile. Une pointe de microscope est placée à l'avant afin de produire d'éventuelles opérations au niveau atomique. Les méthodes d'intégration utilisées pour l'assemblage, des interconnexions et de l'intégration des roues avec les micromoteurs seront discutées dans la section 4.3.

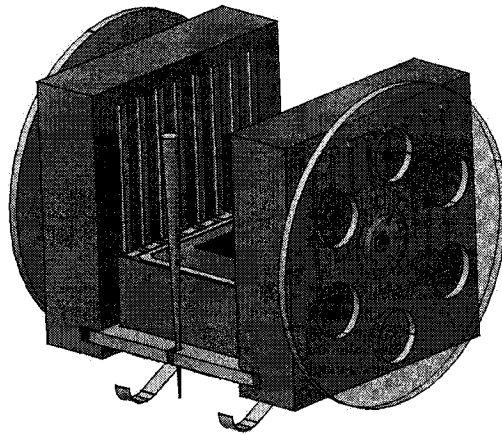


Figure 4.2 : Nouveau modèle du WalkingDie

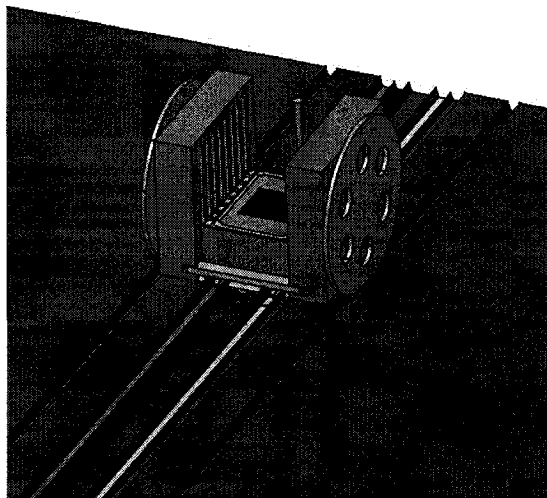


Figure 4.3 : Plancher d'alimentation du WalkingDie

4.3 Contrôle du WalkingDie

4.3.1 Description du System on Chip (SoC)

Le microrobot est contrôlé par un Soc (Figure 4.4) [23] qui génère des séquences de signaux aux micromoteurs électrostatiques permettant de contrôler la direction et la vitesse du WalkingDie. Le SoC est essentiel car il reçoit les commandes venant de l'extérieur, les traite et coordonne le robot dans ses mouvements et ses opérations. Le SoC possède une mémoire de 60 Kilo-octets (Ko) avec une dissipation de puissance de

$16,72\mu\text{W}$ sur une surface de $1,44\text{mm}^2$. L'augmentation résultante de température du SoC est $\sim 29^\circ\text{C}$. Cette augmentation de chaleur est négligeable face à la structure du WalkingDie. Le SoC a été fabriqué avec une technologie $0,18\mu\text{m}$ et mesure $1,2\text{mm} \times 1,2\text{mm}$ avec une épaisseur de $500\mu\text{m}$. Il a été réalisé par Walder André en collaboration avec la CMC.

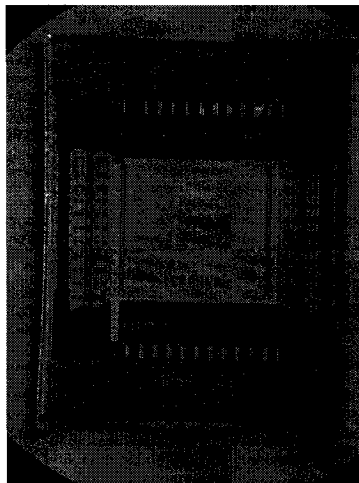


Figure 4.4 : SoC du WalkingDie [23]

4.3.2 Séquence des signaux

Le micromoteur est produit de façon à être quadratique. Le stator possède 12 électrodes et le rotor a 8 palmes (Figure 4.5). Cette configuration permet de toujours avoir une palme entre 2 électrodes et cela à 4 endroits sur le micromoteur. Grâce à la quadrature du micromoteur, à chaque pas, le micromoteur obtiendra 4 fois la force obtenue par un couple palme-électrode. Selon l'ordre des signaux envoyés aux électrodes du micromoteur, on peut contrôler la direction du microrobot (Figure 4.6). Dans le cas de la Figure 4.5, si on applique une différence de potentiel entre le rotor et les électrodes Gpad1, le rotor tournera dans le sens antihoraire. La fréquence des signaux détermine la vitesse des moteurs tandis que l'amplitude de la tension électrique détermine la force développée.

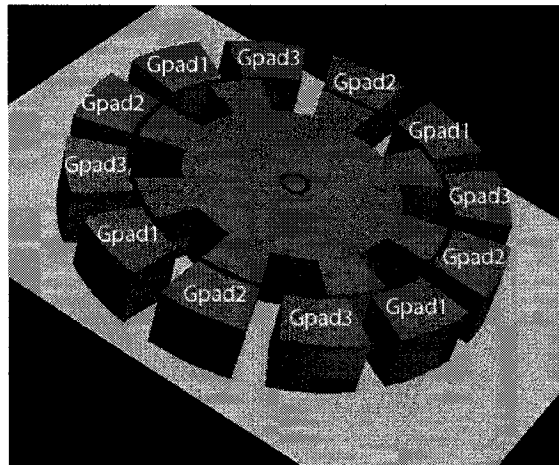


Figure 4.5 : Dessin CAD du micromoteur électrostatique

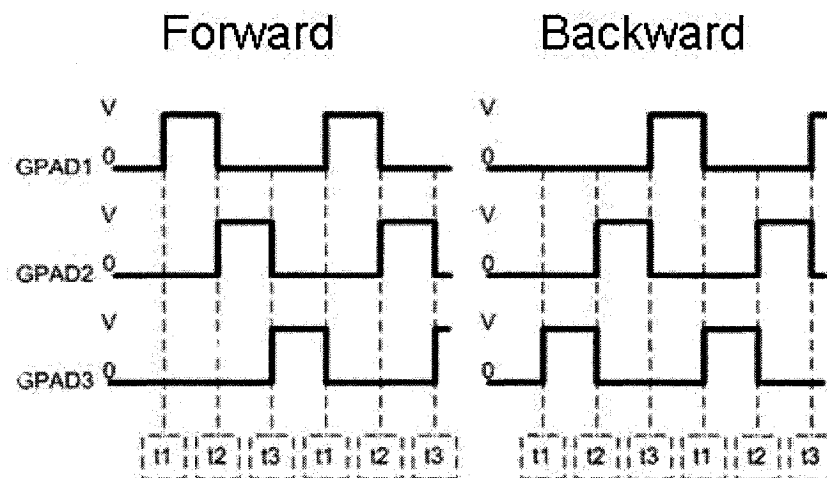


Figure 4.6 : Séquence pour la direction de déplacement

4.4 Intégration

4.4.1 Assemblage du microrobot

4.4.1.1 Création d'un gabarit d'assemblage

L'assemblage des micros pièces (moteurs électrostatique, SoC et une structure de base) pour bâtir le WalkingDie requiert une technique précise. L'utilisation d'un gabarit d'assemblage permettra d'obtenir cette précision. Ce gabarit d'assemblage est produit avec une grande précision afin que les pièces ne se soient pas trop désalignées lors de

l'assemblage. L'appareil utilisé pour produire le gabarit d'assemblage est un *Electro Discharge Machine* (EDM) à fil de modèle ROBOFIL 2030SI et de la compagnie Charmilles. Cet appareil permet de couper, à l'aide d'un fil métallique, n'importe quel matériau conducteur par arcs électriques. La fabrication du gabarit d'assemblage (Figure 4.7) a été produite avec un fil de Cu/Zn et d'une grosseur de 100 μ m. Cet appareil permet d'obtenir une résolution de 10 μ m lors de la coupe par rapport au design théorique. La tolérance de 10 μ m est acceptable pour l'assemblage.

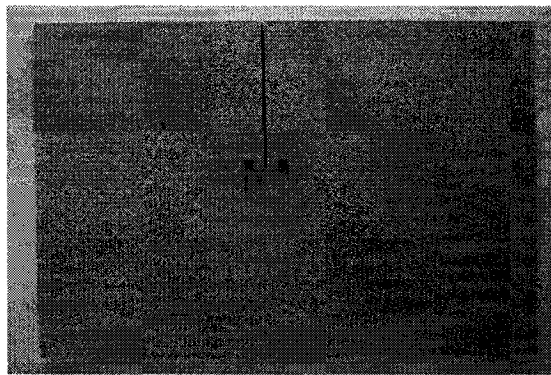


Figure 4.7 : Gabarit d'assemblage

4.4.1.2 Assemblage des pièces

Afin de démontrer l'efficacité de ce gabarit d'assemblage, nous avons produit des pièces fictives en aluminium à l'aide de l'EDM. Le rôle de ces pièces fictives est de valider l'assemblage final du WalkingDie lorsque les vraies pièces seront fabriquées. Ces pièces comprennent deux moteurs électrostatiques, un SoC et une structure de base du robot (Figure 4.8).

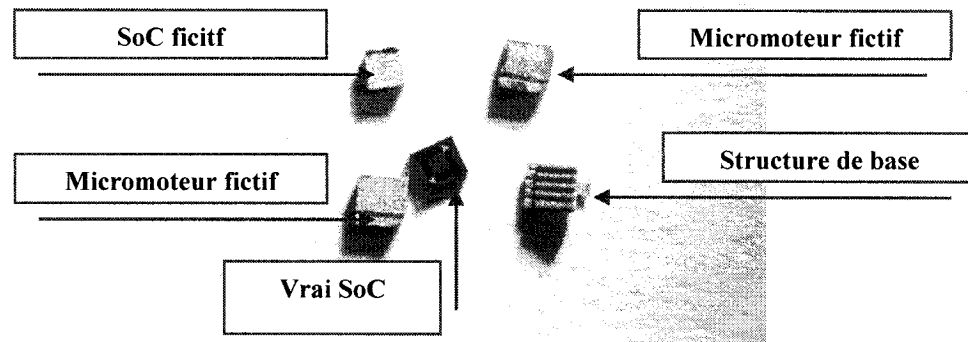


Figure 4.8 : SoC et les pièces fictives du WalkingDie

Ces pièces ont des entailles d'emboîtement afin d'améliorer la performance du gabarit d'assemblage. On doit suivre les étapes suivantes afin d'obtenir un bon assemblage :

1. Insertion des micromoteurs électrostatiques fictifs dans le gabarit d'assemblage;
2. Insertion de la structure de base à l'aide des encaves se trouvant au dos des micromoteurs;
3. Déposition du SoC dans le gabarit d'assemblage;
4. Déposition de petites gouttes de colle aux jonctions des pièces;
5. Retrait de la réplique du WalkingDie du gabarit d'assemblage.

La Figure 4.9 montre l'efficacité du baril d'assemblage et la figure Figure 4.10 donne une idée de la dimension du WalkingDie.

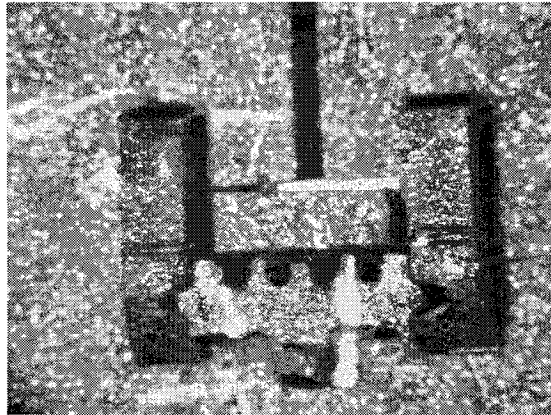


Figure 4.9 : Assemblage des pièces dans le gabarit

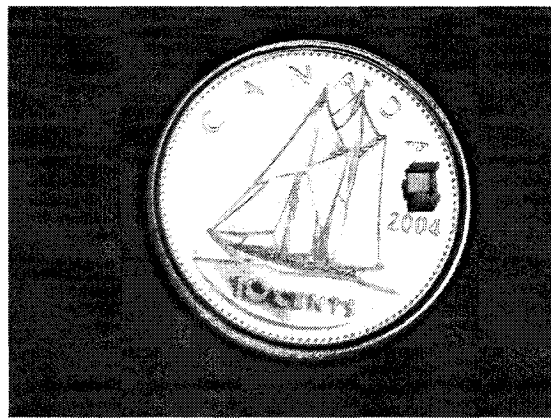


Figure 4.10 : WalkingDie fictif sur un 10 cents canadien

4.4.2 Interconnexions électriques

4.4.2.1 Interconnexions avec un *wire bonder*

Les interconnexions produites avec un *wire bonder* sont couramment utilisées lors de l'encapsulation. Cet appareil permet de produire des interconnexions (Figure 4.11) à l'aide de minces fils d'or ou d'aluminium entre des pads d'interconnexions. Cependant, cet appareil produit des interconnexions uniquement sur un plan, en 2-D. Cela cause un problème car la structure du WalkingDie est en 3-D. De plus, ces interconnexions encombreraient les roues du WalkingDie.

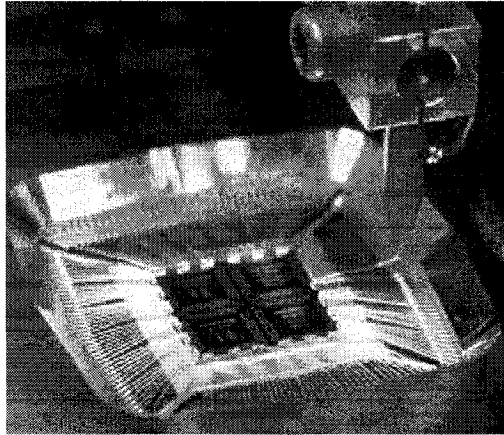


Figure 4.11 : Wire bonder [24]

4.4.2.2 Microvia par procédé de microfabrication

Les interconnexions de type microvia sont produites avec des procédés de microfabrication. Ce type d'interconnexion est très intéressant et très prometteur pour l'encapsulation des MEMs. Elles permettent d'obtenir des interconnexions électriques du microsystème directement sur la face arrière du substrat. Ces microvias sont produits avec une gravure physico-chimique de type Deep Reacting Ions Etching (DRIE). Avec cette technique, on peut produire des microsvias d'une profondeur de $500\mu\text{m}$ à travers le substrat de silicium [25] (Figure 4.12). Par la suite, on remplit ces microvias de cuivre par une technique d'électrodéposition. Ce type d'interconnexion permet d'obtenir une meilleure intégration avec un circuit intégré de type CMOS et permet d'avoir une grande liberté d'action au dessus du microsystème. C'est avec cette technique que seront produites les interconnexions sur nos micromoteurs électrostatiques.

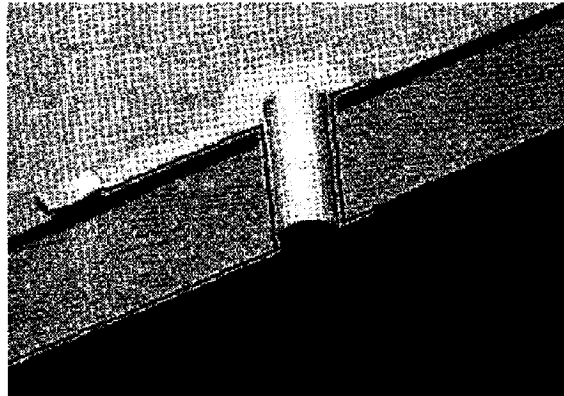


Figure 4.12 : Microvia par DRIE [25]

4.3.3 Intégration des roues avec les micromoteurs

4.4.3.1 Par collage

La technique d'intégration par collage implique de construire, en premier, le rotor du micromoteur et, ensuite, de venir coller une roue à l'aide d'une colle. Cette technique nécessite une grande précision d'assemblage. Un léger désalignement de la jonction rotor-roue impliquerait d'avoir un microrobot qui ne roulerait pas droit. Ce désalignement pourrait aussi créer des frictions supplémentaires dans le micromoteur et ainsi empêcher le robot d'avancer. De plus, lorsque la colle sèche, une contrainte mécanique sera créée à la jonction rotor-roue et il pourrait avoir un risque de déformation du matériau.

4.4.3.2 Monolithique

La technique d'intégration par fabrication monolithique implique de produire le rotor du micromoteur et la roue dans un même matériau (Figure 4.13). Afin d'obtenir cette intégration monolithique pour les micromoteurs, le rotor et la roue sont fabriqués dans un substrat de silicium à l'aide d'un procédé de gravure profonde DRIE. Cette technique permet d'obtenir une grande précision au niveau de l'alignement rotor-roue. Cet alignement de précision se fait à l'aide des procédés d'alignement de

microfabrication [14]. De plus, ce type d'intégration rend la jonction rotor-roue beaucoup plus solide.



Figure 4.13 : Intégration monolithique rotor/roue

4.5 Modèle du micromoteur électrostatique en fonction du design du WalkingDie

Le nouveau design du WalkingDie et les différentes approches d'intégration permettent de présenter un nouveau type de micromoteur électrostatique qui pourra faire avancer le WalkingDie. Ce nouveau micromoteur devra avoir un haut facteur de forme afin d'obtenir une grande force tangentielle (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Il sera produit sur une gaufre SOI afin d'isoler les électrodes du substrat. L'intégration rotor-roue sera fabriquée de manière monolithique afin d'obtenir une grande robustesse et une plus grande précision au niveau de la jonction. Pour les interconnexions, on procèdera à la création des microvias par procédé DRIE. Afin de contrer le poids et la friction au sol lors des déplacements du WalkingDie, ces micromoteurs devront fournir un couple moteur minimal de $53,8 \times 10^{-12}$ Nm [22].

4.6 Conclusion

Le choix d'une nouvelle structure du WalkingDie et des approches d'intégration pour l'assemblage, les interconnexions et la jonction rotor-roue nous a permis de définir le

design de la nouvelle génération de micromoteurs électrostatiques. Ce choix étant fait, le prochain chapitre traite de la fabrication des nouveaux micromoteurs.

Chapitre 5 : Fabrication et résultats expérimentaux

5.1 Introduction

La création de ces micromoteurs électrostatique nécessite plusieurs étapes de procédés de microfabrication. Ces étapes sont : le choix du type d'échantillon, la photolithographie, la gravure DRIE, le décollage de la résine, la libération des structure par gravure chimique et l'assemblage. Ce premier développement de micromoteur ne sera pas fait avec des *dimples* afin de pouvoir minimiser les procédés de microfabrication. Cette décision a été prise afin d'être capable d'atteindre la fabrication complète des micromoteurs avant la fin de cette maîtrise.

5.2 Échantillons de travail

5.2.1 Échantillons de test

Pour les développements des différents procédés de la microfabrication des nouveaux micromoteurs électrostatique, nous avons besoin d'échantillon à faible coût. Nous savons que pour le modèle final, nous devons utiliser une gaufre de type *Sililicon Oxyde Insulator* (SOI). Cette SOI entraine des frais élevé. Afin d'atténuer les coûts lors du développement des procédés, nous utiliserons des gaufres recyclées de 100mm de la compagnie Dalsa.

5.2.2 Échantillon pour la version finale

Une fois que tous les procédés de microfabrication sont développés, on peut utiliser une SOI de 100mm de la compagnie Ultrasil afin de produire la version finale des micromoteurs électrostatiques. Une SOI est constitué d'une couche d'oxyde en sandwich entre 2 gaufres de silicium. La couche supérieure de silicium nommé *device* est la seule à être usinée, la couche d'oxyde est sacrificielle et la couche inférieure de silicium

handle sert uniquement de support. Le Tableau 5.1 démontre les caractéristiques des SOI de 100mm qui ont été utilisées.

Tableau 5.1 : Caractéristiques de la SOI

SOI de la compagnie Ultrasil	
Dopant	Type N : Phosphore
Orientation	<1-0-0>
Épaisseur <i>device</i>	200(+/-2) μ m
Résistivité de la SOI	1-10 Ω
Épaisseur de l'oxyde	1 μ m
Épaisseur du <i>holder</i>	400(+/-5) μ m
Fini de surface	Par polissage

5.3 Nettoyage et déshydratation des échantillons

5.3.1 Description

5.3.1.1 Nettoyage des gaufres de silicium

Le nettoyage des échantillons est primordial lorsqu'on veut faire des microsystèmes. En effet, chaque étape de microfabrication nécessite d'être exécutée sur des échantillons propres afin que les saletés, les graisses, les ions métalliques et l'oxyde natif n'influencent pas les procédés utilisés et ne nuisent pas à la qualité des structures obtenues.

5.3.1.2 Déshydratation des échantillons

Après le nettoyage des échantillons, il est important de les déshydrater afin qu'il ne reste plus aucune trace d'humidité (molécule d'eau) sur la surface devant être usinée. Cette élimination presque complète de l'eau à la surface du silicium permet une meilleure adhérence de la photorésine lors des étapes de photolithographie ce qui donne des motifs de bien meilleure résolution.

5.3.2 Recette utilisée

Le nettoyage des échantillons pour la fabrication des micromoteurs a été effectué avec une recette de nettoyage des graisses et des saletés préalablement développée par le LMF. Cette recette est constituée de 6 bains et d'une durée de 5 minutes chacun. La recette est la suivante :

- 1 bain d'optclair
- 1 bain d'acétone
- 1 bain de 2-propanol
- 1 bain d'eau DI
- Rinçage de l'échantillon à l'eau DI
- Séchage de l'échantillon avec un jet d'azote

- 1 bain de HF 1%
- 1 bain d'eau
- Rinçage de l'échantillon à l'eau DI
- Séchage de l'échantillon avec un jet d'azote

- Déshydratation de 1 heure des échantillons dans un four à 120°C.

Les 4 premiers bains dégraissent et ôtent les poussières de l'échantillon et le bain de HF 1 % permet de désoxyder les échantillons de silicium. On finit toujours par un séchage à l'azote de l'échantillon afin que l'eau ne laisse aucune trace lors de son évaporation.

5.4 Photolithographie

5.4.1 Description

Ce procédé consiste à transférer des motifs, venant d'un masque de photolithographie, sur une mince couche de photorésine couvrant la gaufre à usiner.

5.4.2 Fonctionnement

L'étape de photolithographie en elle-même comporte plusieurs parties : Le *design* du masque de photolithographie, la déposition de la résine, l'insolation et le développement.

5.4.3 Développement du *design* du masque de photolithographie

5.4.3.1 Utilisation du masque pour la photolithographie

Le choix d'un bon masque est primordial lors de la fabrication d'un microsystème. Afin de faire des tests de procédés, une des premières étapes fut l'achat d'un masque avec une résolution de $30\mu\text{m}$ qui fut produit par la compagnie d'impression Typo Express avec une imprimante à 5080dpi. L'achat du masque tenait compte du fait que nos structures étaient d'une grandeur située entre $90\mu\text{m}$ et $150\mu\text{m}$ donc plus élevées que la résolution que la compagnie nous garantissait ($20\mu\text{m}$). Malheureusement, lors de la gravure profonde, la présence d'ondulation au niveau des flancs (Figure 5.1) indiquait qu'il y avait un problème au niveau du masque de lithographie. La découverte d'ondulations similaires sur les côtés des structures lors d'observation faite au microscope a permis de confirmer l'origine des ondulations remarquées à la gravure (Figure 5.2). Par ailleurs, toujours en raison de la résolution du masque, les structures qui étaient circulaires à l'origine apparaissaient plus comme des polygones (Figure 5.3). Pour continuer les tests et afin de produire le microsystème, l'achat d'un masque

possédant une meilleure résolution était donc capital afin de poursuivre les tests de gravure et être en mesure de produire les micromoteurs.



Figure 5.1 : Ondulations sur les flancs de gravure

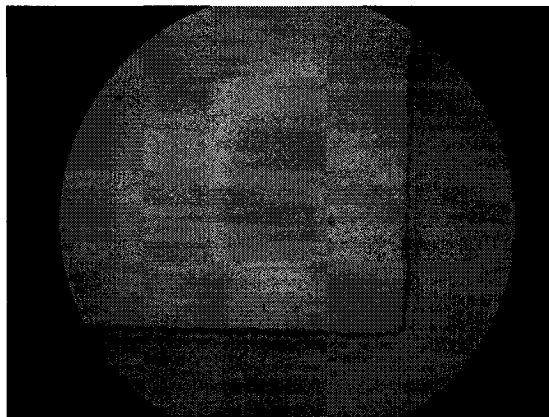


Figure 5.2 : Ondulations sur le masque de photolithographie

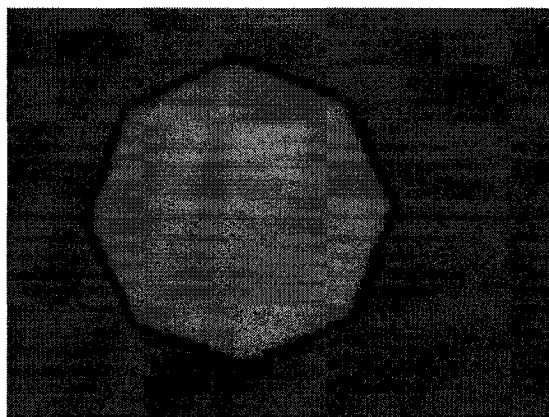


Figure 5.3 : Cercle sur le masque de photolithographie

Le choix s'est arrêté sur un masque de quartz de la compagnie ADTEK avec une résolution garantie de 1µm. Avec le nouveau masque, les gravures profondes (Figure 5.4) n'ont plus d'ondulation sur les flancs. Les formes circulaires sont bien rondes et non polygonales (Figure 5.5). Grâce aux flancs lisses ainsi obtenues, l'effet électrostatique du moteur sera plus uniforme, d'où une meilleure efficacité du système.

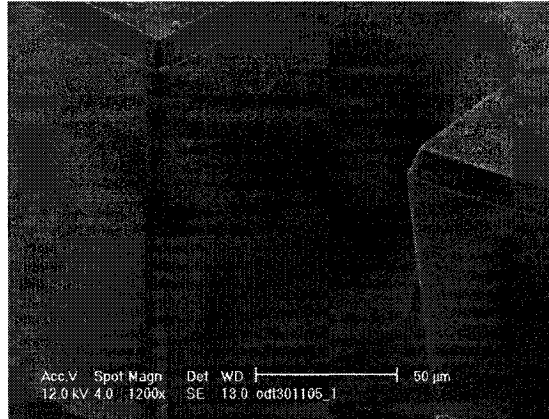


Figure 5.4 : Flancs de gravure sans ondulations avec le masque de quartz

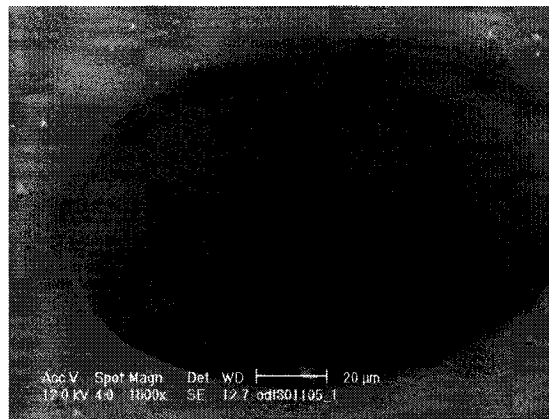


Figure 5.5 : Gravure de cercles avec le masque de quartz

5.4.3.2 Description du masque de lithographie

Le masque de quartz utilisé comprend plusieurs parties distinctes. Tout d'abord, le masque est divisé en 2 : une moitié est destinée au projet WalkingDie et l'autre moitié au projet Magnetotactic Bacteria based Systems (MBS) [26]. Dans la moitié destinée au WalkingDie, on retrouve les moteurs électrostatiques (rotor et stator), les pointes de

flottement, des plages d'alignement, des motifs de contrôle de la qualité des procédés ainsi que des matrices de rond pour les microvias d'interconnexions (Figure 5.6).

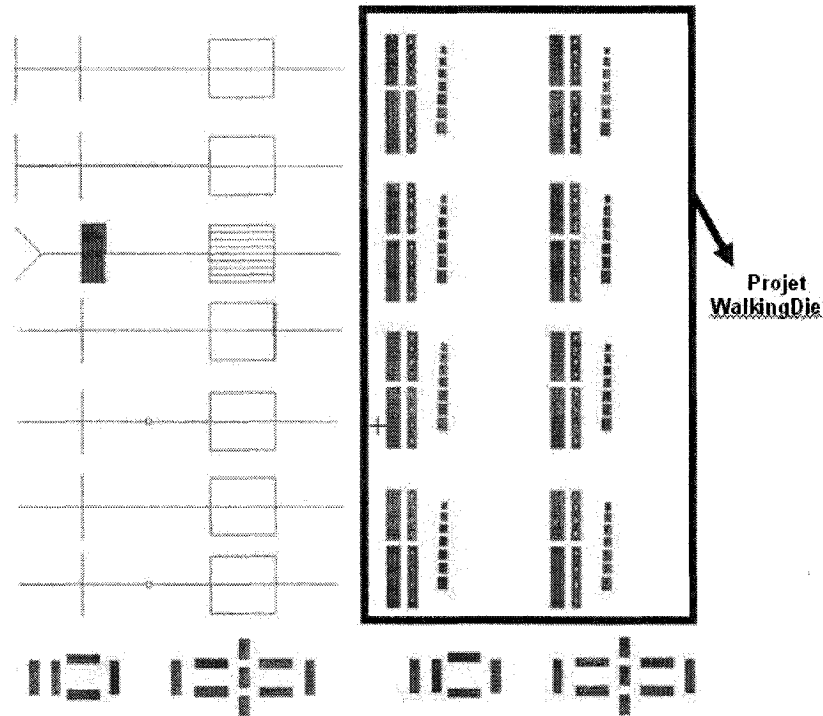


Figure 5.6 : Partie WalkingDie sur le masque PolyLu

5.4.3.3 Les moteurs électrostatiques (rotor et stator)

Sur le masque de lithographie, des rotors et des stators de différentes dimensions s'y retrouvent afin de pouvoir obtenir une variété de combinaisons et ainsi permettre de concevoir le moteur optimal tout en tenant compte des contraintes d'assemblage. Le Tableau 5.2 et la Figure 5.7 décrivent ces différentes combinaisons.

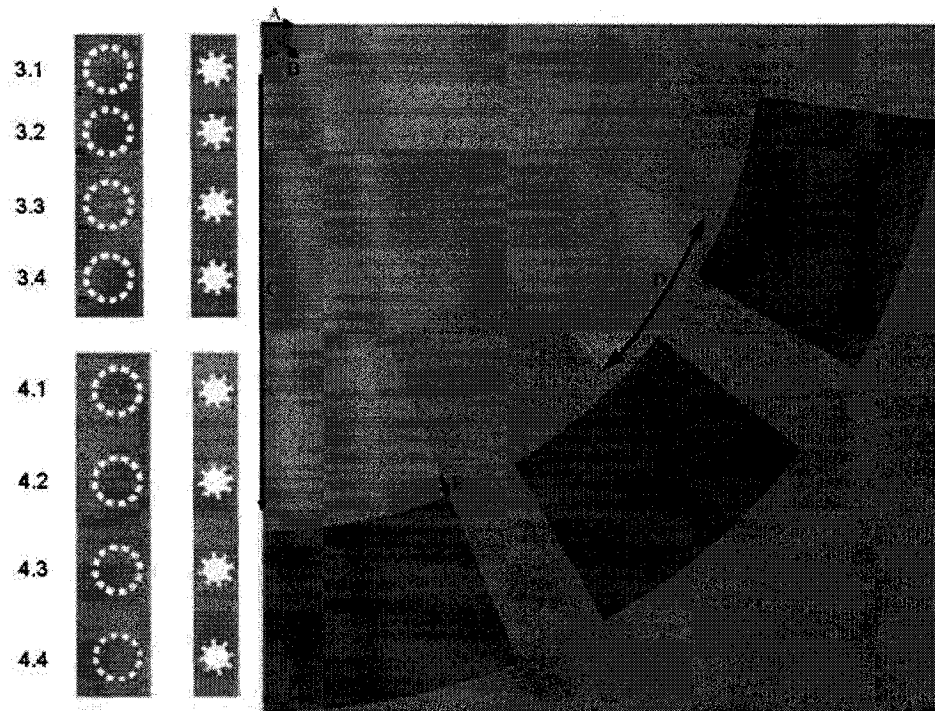


Figure 5.7 : Description des moteurs électrostatiques pour le Tableau 5.2

Tableau 5.2 : Descriptions des moteurs électrostatiques

Modèle	A (μm)	B (μm)	C (μm)	D (μm) ou ($^\circ$)	E (μm)
3.1	70	5	1000	384 ou 22	10
3.2	70	5	1000	349 ou 20	10
3.3	90	15	1000	384 ou 22	20
3.4	70	15	1000	384 ou 22	20
4.1	104	18	1000	384 ou 22	20
4.2	80	15	1000	384 ou 22	20
4.3	84	13	1000	384 ou 22	15
4.4	80	13	1000	349 ou 20	20

5.3.3.4 Les pointes de flottement

Les pointes de flottement servent à éviter une trop grande friction entre le rotor et la surface sur laquelle elle repose. On essaie d'obtenir un effet de lévitation qui permet de réduire au minimum voire annuler toute force de capillarité entre le rotor et la surface.

Sur le masque de lithographie, on retrouve 4 pointes de flottement d'un diamètre de $1\mu\text{m}$ pour chaque rotor. Ces pointes sont placées de façon uniforme sur le rotor afin de bien répartir le poids et l'équilibre du rotor. Elles sont alignées avec le rotor à l'aide des plages d'alignement sur le masque. On peut voir sur la Figure 5.8 un exemple d'une pointe de flottement obtenue en utilisant un procédé MUMPs.

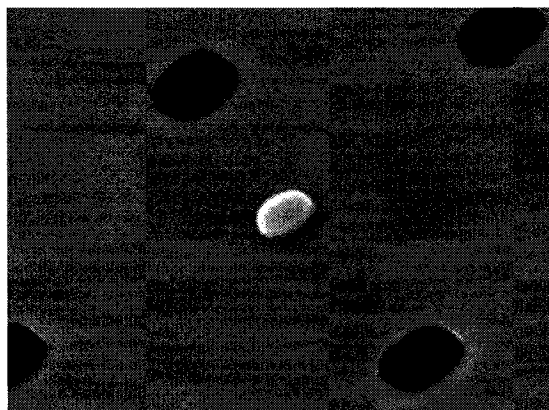


Figure 5.8 : Pointe de flottement (dimple)

5.4.3.5 Les plages d'alignements

Les plages d'alignements permettent d'aligner les pointes de flottement avec les rotors des moteurs électrostatiques (Figure 5.9). Ces plages d'alignement sont essentielles afin de placer les pointes de flottement aux bons endroits et ceci avec une précision de $1\mu\text{m}$. Pour procéder à l'alignement, deux éléments sont nécessaires : Le support d'alignement (Figure 5.10) et la croix d'alignement (Figure 5.11). Chacun des éléments d'alignement sont reliés à une partie de la structure du microsystème. Pour les moteurs électrostatiques de notre masque, les supports d'alignement sont reliés aux pointes de flottement et les croix d'alignement sont reliées aux rotors.

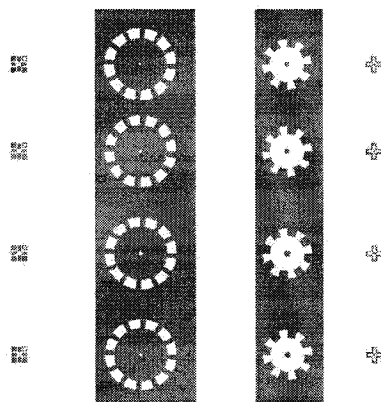


Figure 5.9 : Plages d'alignement sur le masque

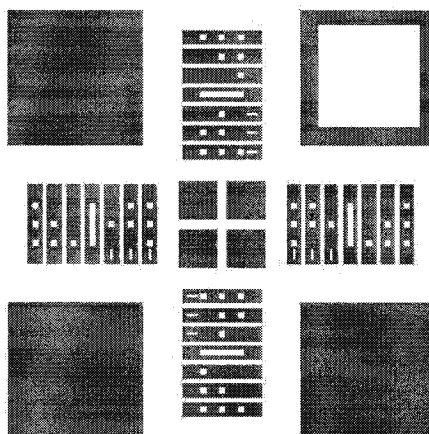


Figure 5.10 : Support d'alignement

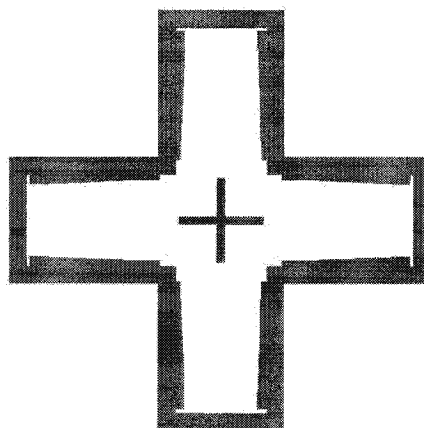


Figure 5.11 : Croix d'alignement

Quand la croix d'alignement est alignée avec le support d'alignement, les deux motifs se superposent parfaitement (Figure 5.12), ce qui permet de savoir que les pointes de flottement sont placées de façon uniforme et précise sur le rotor. La première étape d'alignement consiste à faire correspondre le + du centre de la croix d'alignement à celui du centre du support d'alignement. Afin d'assurer au micron près la bonne disposition des pointes de frottement, un système de repère plus élaboré se retrouve sur chaque ailette de la croix d'alignement (Figure 5.13). Sur chaque barre des ailettes du support d'alignement on retrouve des carrés et des rectangles. Chaque carré est associé à une unité de $1\mu\text{m}$ pour l'alignement. Pour ce qui est des barres avec des carrés et sans rectangle, le nombre de carré représente le nombre de micron que la croix d'alignement devrait recouvrir sur la barre du support d'alignement. La barre avec un grand rectangle représente une distance de $<1\mu\text{m}$ entre la croix d'alignement et la barre du support d'alignement. Finalement, pour les barres avec des carrés et un rectangle à côté, le nombre de carré représente le nombre de microns qui sépare la croix d'alignement de la barre du support d'alignement. Ces motifs sont extraits du Center of Micronanotechnology (CMI) [27].

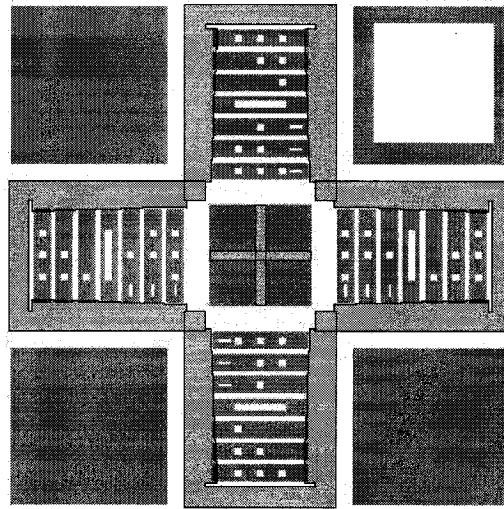


Figure 5.12 : Alignement de la croix avec le support

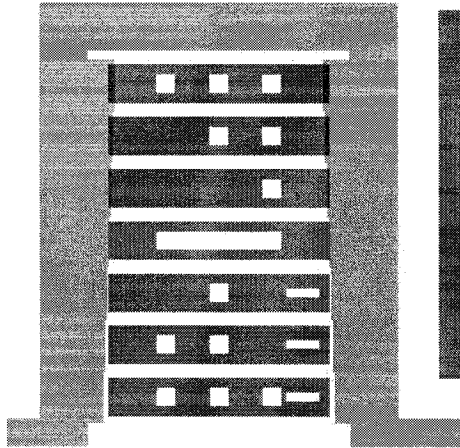


Figure 5.13 : Zoom sur une ailette lors de l'alignement

5.3.3.6 Les motifs de contrôle de la qualité des procédés

Les motifs de contrôle de la qualité des procédés (Figure 5.14) sont couramment utilisés pour évaluer chacune des étapes successives de la procédure de microfabrication du moteur électrostatique. Dans notre cas, on utilisera ces motifs de contrôle pour les étapes d'exposition et développement de la photo résine lors de la lithographie et de la gravure DRIE. Ce motif de contrôle est constitué de 9 échelles s'échelonnant de $1\mu\text{m}$ à $5\mu\text{m}$ avec des intervalles de $0,5\mu\text{m}$. Chaque échelle possède un numéro qui indique la largeur de trace ainsi que la distance entre chaque trace. Chaque échelle est dessinée en motif positif (blanc sur fond rouge) et en motif négatif (rouge sur fond blanc) afin d'évaluer le plus de situations possible. Sur le masque utilisé, ces motifs ont été placés de façon uniforme afin d'évaluer les procédures de microfabrication à différents endroits de la plaque (Figure 5.15). Ces motifs ont été pris du CMI [27].

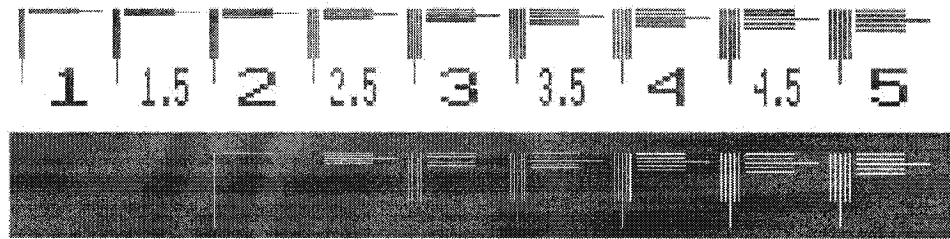


Figure 5.14 : Motifs de contrôle de la qualité

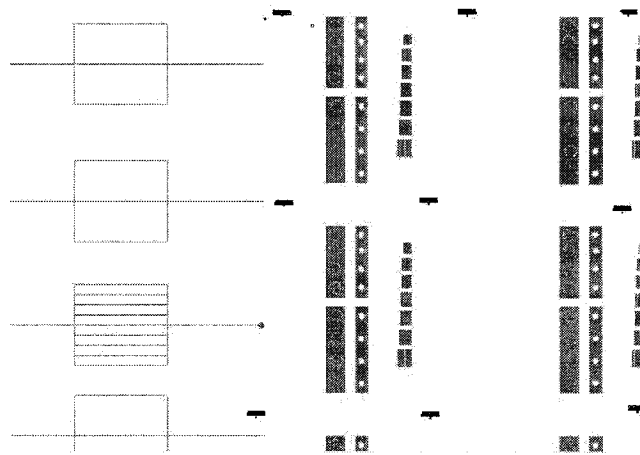


Figure 5.15 : Répartition des motifs de contrôle de la qualité

5.4.3.7 Les matrices de trous pour les vias d'interconnexions.

Des matrices de trous de 10×10 éléments ont été inscrites sur le masque afin de pouvoir élaborer la bonne dimension de vias devant assurer les interconnexions entre les moteurs et le SoC . On compte 7 différentes grandeurs de trous et de traces (Figure 5.16). Ces traces ont été instaurées afin de créer les traces d'alignement lors de l'assemblage du robot et afin de voir la différence de comportement du silicium lors de la gravure DRIE d'une trace ou d'un trou. Toutes les traces ainsi que tous les trous dans les matrices sont séparés par une distance fixe de $100\mu\text{m}$. Les 7 différentes dimensions de trous et de traces sont : $50\mu\text{m}$, $80\mu\text{m}$, $90\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, $110\mu\text{m}$, $120\mu\text{m}$ et $150\mu\text{m}$.

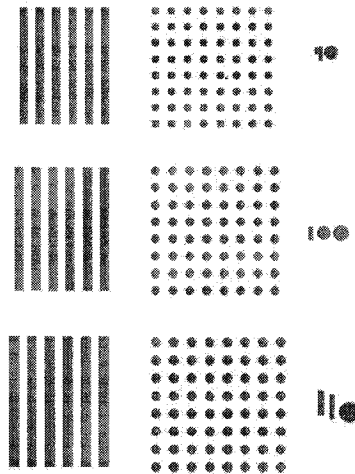


Figure 5.16 : Matrices de trous et de traces

5.4.4 Développement du procédé de dépôt de la photorésine

5.4.4.1 Méthode de dépôt de la photorésine

L'étalement de la résine se fait avec une tournette de modèle WS-200-4NPP/RTV de la compagnie Laurell (Figure 5.17). L'échantillon est déposé sur le porte échantillon et il est retenu pas le vide. La résine doit être déposée sans bulle. Si il y a des bulles sur l'échantillon, des défauts se créeront. Une fois la tournette activée, on peut augmenter la vitesse de rotation graduellement jusqu'à la vitesse requise pour obtenir une épaisseur de photorésine choisie. La rotation s'arrête automatiquement lorsque la minuterie arrive à zéro.

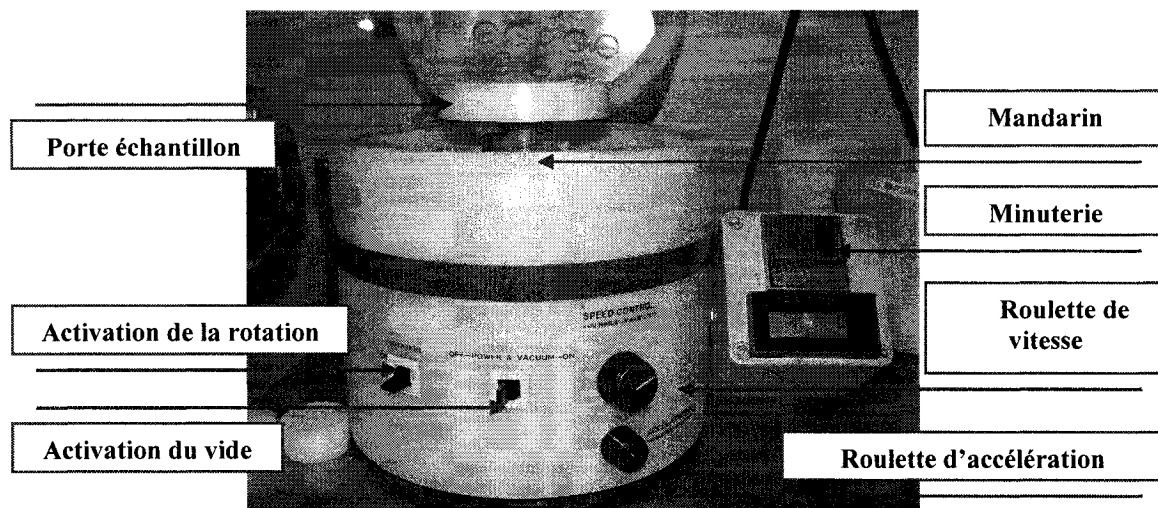


Figure 5.17 : Tournette Laurell WS-200-4NPP/RTV

5.4.4.2 Résine S1813

La photorésine S1813 est une photorésine positive qui est utilisée pour la fabrication de circuits intégrés en microélectronique. On peut déposer des couches de cette photorésine de façon uniforme avec des vitesses d'étalement variant entre 2000 et 5500 tour/min. Cette fourchette de vitesse nous permet de déposer des épaisseurs variant entre $1,2\mu\text{m}$ et $1,8\mu\text{m}$ (Figure 5.18). Un promoteur d'adhérence est utilisé afin d'améliorer l'adhésion entre la photorésine et le substrat. Afin de durcir la résine après l'étalement, un premier recuit « softbake » est effectué sur l'échantillon pendant 60 secondes à 115°C . L'exposition de la photorésine doit se faire avec une lampe UV ayant une longueur d'onde variant entre 350nm et 450nm. Lors du développement, il est possible d'obtenir des motifs avec une résolution pouvant atteindre $0,48\mu\text{m}$. Il est important de conserver la photorésine dans un environnement sec, à l'abri de la lumière et dans un fourchette de température ambiante variant entre 10° et 21°C .

MICROPOSIT S1800 PHOTO RESIST UNDYED SERIES
Figure 1. Spin Speed Curves

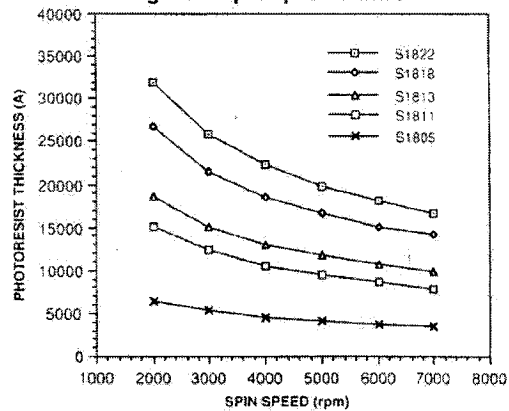


Figure 5.18 : Table d'étalement de la photorésine S1813 [28]

5.4.4.3 Résine SPR220-7.0

La photorésine SPR220-7.0, de la compagnie Shipley est une résine positive qui est surtout utilisée pour la fabrication de MEMs mais aussi pour l'électrodéposition. Cette résine est appréciée pour sa flexibilité car son utilisation ne se limite pas uniquement au silicium; elle est utilisée avec d'autres matériaux tels le Al_2O_3 , Au, Cu, Fe-Ni, etc... . Tout comme pour la résine S1813, un promoteur d'adhérence est étendu sur la gaufre afin d'améliorer l'adhésion entre la photorésine et le substrat. Cette photorésine est excellente pour les gravures chimiques et sèches. Des couches de $5,5\mu\text{m}$ à $10\mu\text{m}$ sont étalées avec des vitesses d'étalement entre 1500 et 6000 tours/minute (Figure 5.19). Afin de durcir la photorésine après son application, un premier recuit « softbake » est effectué. L'échantillon, qui est à température ambiante, doit atteindre 115°C en 30 secondes. Une fois cette température atteinte, elle doit être maintenue pendant 90 secondes. L'exposition se fait avec une lampe UV ayant une longueur d'onde variant entre 350nm et 450nm. Après l'exposition, l'échantillon repose 35 minutes afin que la photo réaction avec la photorésine soit complète. Pour développer cette photorésine, un développeur du type Metal-Ion-Free ou Bearing Developers est utilisé. Cette résine est reconnue pour avoir une bonne sélectivité face à la gravure sèche. C'est ainsi qu'avec un procédé de gravure Deep Reactive Ion Etching de type Bosch, on peut obtenir une sélectivité de 75:1. Il est important de conserver la photorésine dans un environnement

sec et dans une gamme de température variant entre 10° et 21°C. Il est aussi important de tenir cette photorésine loin d'un oxydant, d'un acide ou d'une base.

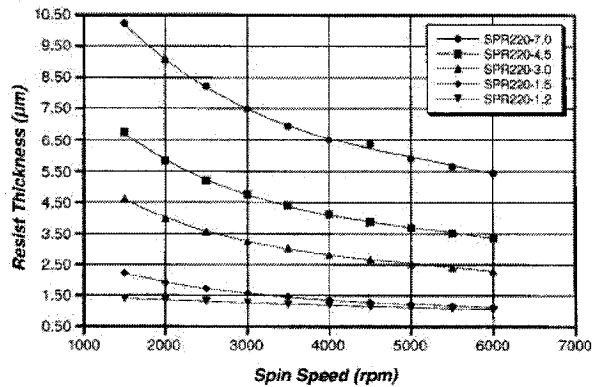


Figure 5.19 : Table d'étalement de la photorésine SPR220 [29]

5.4.4.4 Photorésine utilisé

Pour la fabrication des micromoteurs électrostatique, la SPR220 est utilisée car elle permet de travailler avec des épaisseurs beaucoup plus intéressantes que celles de la SP1813. Cette photorésine est plus résistance à la gravure profonde sèche. En effet, ce choix a été motivé par la nécessité, dans ce cas-ci, d'une gravure DRIE d'une structure de 200µm d'épais dans un substrat de silicium.

5.4.4.5 Soft bake de la résine

Le softbake permet de faire évacuer une importante quantité de solvant encore présente dans la photorésine après son étalement à la tournette. Cette technique permet de faire durcir la résine afin que l'exposition de la lithographie soit bien définie et qu'elle ne colle pas au masque de photolithographie lors de l'exposition par contact.

5.4.5 Développement de procédé pour l'insolation

5.4.5.1 Méthode d'utilisation de l'aligneuse de masque

L'insolation de la résine se fait avec l'aligneuse de masque M4 de la marque Karl Suss (Figure 5.20) et une lampe au mercure. Cette aligneuse de masque permet de faire de la photolithographie par contact. Tout le système doit être refroidi à l'azote gazeux. Si la lampe n'est pas refroidie, elle risque d'exploser et de contaminer toute la pièce avec des vapeurs de mercure. Le masque de photolithographie est placé de manière à ce que la couche de chrome du masque soit directement en contact avec l'échantillon (écriture à l'envers face à l'opérateur). Le masque est tenu par le vide créé par le porte masque. Lors de l'insolation, l'aligneuse de masque ouvre le diaphragme permettant ainsi au rayon UV d'insoler l'échantillon pour le temps voulu. Cette exposition permet de briser les chaînes polymériques de la photorésine positive aux endroits du masque de lithographie qui sont transparents aux UV (correspondant aux motifs voulus). Une fois l'insolation finie, l'échantillon est laissé au repos avant de passer à l'étape du développement.

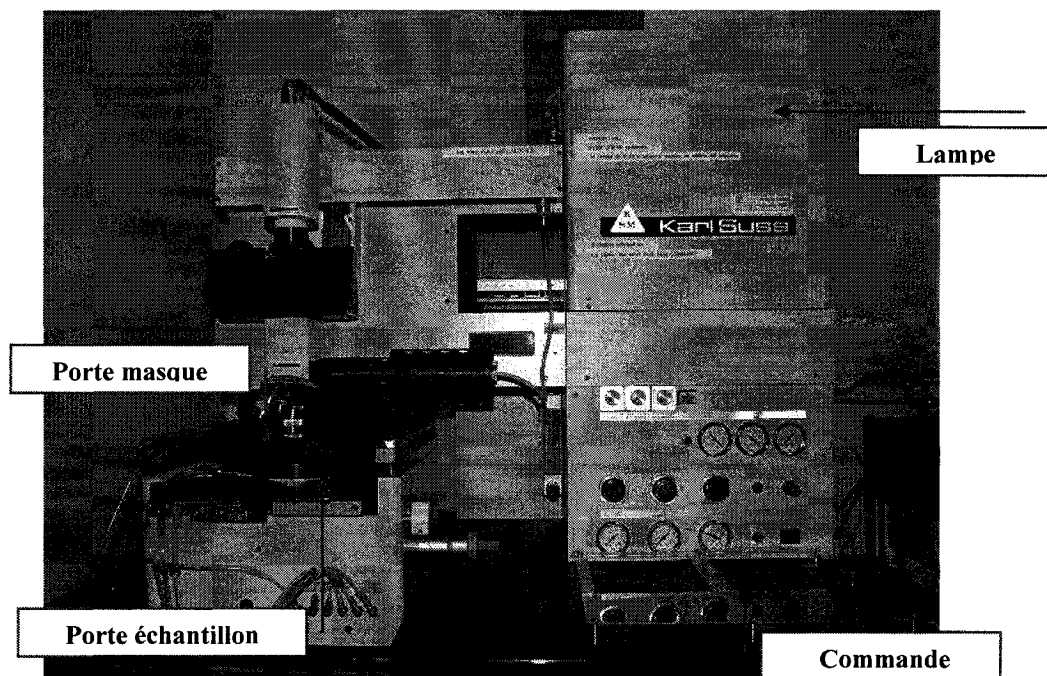


Figure 5.20 : L'aligneuse de masque M4 Karl Suss

5.4.5.2 Temps d'insolation

Le temps d'insolation est relatif à la puissance que la lampe fournit. La puissance que fournit la lampe au mercure peut varier en fonction de son usure et de sa qualité d'ajustement (alignement des miroirs de l'aligneuse de masque). Afin d'obtenir le meilleur temps d'insolation pour une même puissance donnée par la lampe, les motifs de contrôle de la qualité sont utilisés (Figure 5.14). Ainsi, pour établir un bon temps d'insolation, il faut vérifier que les dimensions des motifs blancs sur fond rouge sont bien respectées, sachant que lors du développement, un motif trop large indiquera une surexposition tandis qu'un motif trop étroit correspondra à une sous exposition. Lors du développement, si un motif est trop large, il y a surexposition et si un motif est trop étroit, il y a sous exposition. On obtient un temps d'exposition acceptable lorsque la grandeur des motifs est parfaitement respectée. La détermination du meilleur temps d'insolation pour une puissance donnée nécessite ainsi plusieurs itérations.

5.4.6 Développement du procédé pour le développement

5.4.6.1 Développement

L'étape de développement permet de décoller la résine positive insolée de l'échantillon. Pour ce faire, l'échantillon est mis dans un bain du développeur recommandé et agité. Pour la résine SPR220, le développeur MICROPOSIT MF 319 est utilisé. Ce développeur s'attaque rapidement à la résine dont les liens sont rompus, mais s'attaque aussi à la résine non insolée d'où l'importance de respecter strictement les temps de développement prescrits.

5.4.6.2 Temps de développement

Le temps de développement est relatif au temps d'insolation et à la puissance que la lampe fournit lors de l'insolation. Afin de déterminer le meilleur temps de développement, les motifs de contrôle de la qualité sont utilisés (Figure 5.14). Pour

établir un bon temps de développement, la même méthode itérative que pour le temps d'insolation est utilisée mais en s'intéressant cette fois-ci au motifs rouges sur fond blanc. Dans ce cas, un motif trop étroit indique un sous développement. Cette technique permet de trouver le bon temps de développement pour un temps d'insolation donné et une puissance donnée.

5.4.6.3 Recuit de la résine

On recommande souvent de faire un recuit de la photorésine afin qu'elle soit plus résistante à la gravure chimique ou à la gravure sèche. Cependant, dans le cas de la SPR220, il est déconseillé de le faire car la photorésine a tendance à s'évaser (Figure 5.21); or si la photorésine s'évase, la gravure ne sera pas totalement directionnelle et la grosseur des motifs risque de changer.

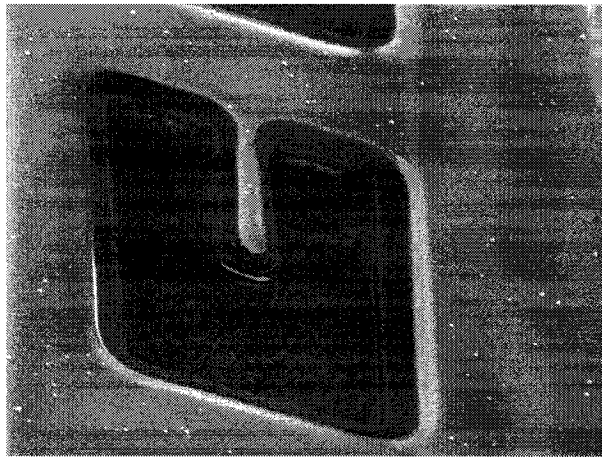


Figure 5.21 : Photorésine évasée lors d'un recuit de la SPR220

5.4.4 Recette utilisée

La recette de photolithographie utilisée pour la conception des micros moteurs électrostatiques. Cette recette donne une couche de résine d'environ 7,5 microns et une résolution d'environ $2\mu\text{m}$ dû à la difficulté d'utilisation des résines épaisses et à la lampe qui n'est pas parfaitement alignée.

- Prendre les échantillons du four de déhydratation;

- Laisser reposer l'échantillon durant 5 minutes;
- Mettre l'échantillon sur le porte échantillon de la tournette;
- Faire le vide au niveau du porte échantillon afin de bien tenir l'échantillon lors de la rotation;
- Déposer et étaler la résine sur l'échantillon sans qu'il n'y ait de bulles d'air;
- Programmer la minuterie à 45 secondes;
- Activer la rotation : 5 secondes à 500 tours/min et augmenter graduellement (en 3 secondes) jusqu'à 3500 tour/min;
- Mettre la vitesse de rotation à 0, fermer l'activation de la rotation et désactiver le vide;
- Sortir l'échantillon de la tournette et mettre l'échantillon sur la plaque chauffante à 65°C pendant 30 secondes;
- Après 30 secondes, augmenter la température de la plaque chauffante à 115°C et laisser l'échantillon sur la plaque jusqu'à 115°C. Une fois cette température atteinte, laisser l'échantillon 90 secondes de plus sur la plaque;
- Laisser reposer l'échantillon 5 minutes;
- Mettre en marche l'aligneuse de masque;
- Programmer le temps d'exposition à 22 secondes (cette donnée est pour une lampe neuve qui donne une puissance de 9,0 Watts);
- Installer le masque des moteurs électrostatiques (PolyLu) sur le porte masque de l'aligneuse de masque;
- Mettre l'échantillon sur le porte échantillon de l'aligneuse de masque.
- Faire l'exposition;
- Enlever l'échantillon et laisser reposer l'échantillon 35 minute sous la hotte;
- À 10 minutes avant la fin de la période de repos, mettre l'échantillon sur une plaque chauffante à 50°C pour une période de 1 minute et remettre l'échantillon sous la hotte;

- Développer l'échantillon avec le développeur MICROPOSIT MF 319 avec une légère agitation pendant une période de 1 minute 45 secondes;
- Rincer à l'eau afin de neutraliser le développement;
- Sécher l'échantillon avec un jet d'azote;
- L'échantillon est maintenant prêt pour la gravure.

5.5 Gravure physico-chimique

5.5.1 Technique de gravure

5.5.1.1 RIE

Le procédé de gravure DRIE est une évolution du procédé de gravure *Reactive Ion Etching* (RIE). Cette évolution permet d'obtenir une gravure directionnelle et cela à de grandes profondeurs.

Lors du procédé RIE (Figure 5.22), un plasma haute densité est créé entre 2 plaques par une différence de potentiel, ce qui permet d'ioniser le milieu. Cette différence de potentiel indique une direction dans laquelle les ions radicaux (négatif) vont bombarder la gaufre de silicium. Lors du bombardement des ions réactifs sur la gaufre, la gravure est de type chimique et mécanique. Une grande puissance est nécessaire afin de maintenir le plasma fonctionnel. Toutefois, plus cette puissance est importante, plus l'énergie des ions en est augmentée, ce qui ne donne pas une gravure directionnelle lorsqu'on désire graver en profondeur. C'est pour cette raison que la gravure DRIE sera utilisée dans ce procédé de microfabrication.

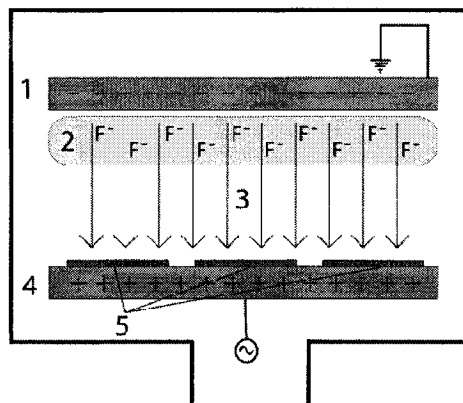


Figure 5.22 : Procédé de gravure RIE [30]

5.5.1.2 DRIE

La gravure DRIE est un outil technologique majeur dans la conception de nouveaux types de microsystèmes. Dans le procédé DRIE (Figure 5.23), on divise le procédé RIE

en 2 parties distinctes : le création du plasma par induction à partir du/des gaz(s) introduit et la direction de l'attaque chimique des ions réactifs. Dans un premier temps, un plasma haute puissance est créé par induction dans la partie supérieure de la chambre de réaction. Dans un deuxième temps, l'échantillon est polarisé avec une faible puissance afin que les ions réactifs du plasma haute puissance soient dirigés vers l'échantillon de manière plus directionnelle.

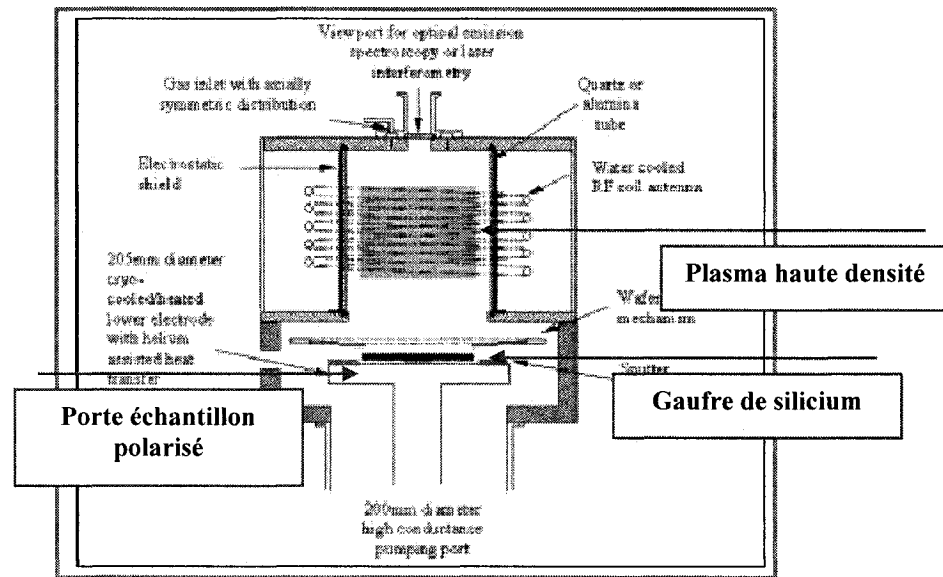


Figure 5.23 : Procédé de gravure DRIE [31]

Les choix des gaz sont importants car ils doivent réagir chimiquement avec le substrat attaqué. Ce procédé DRIE est utilisé afin d'obtenir des profils droits à haut facteur de forme dans un substrat de silicium. Afin de graver nos échantillons avec le procédé de gravure physico-chimique DRIE, un ICP modèle PlasmalabSystem100180 de la compagnie Oxford [32] est utilisé. Deux modes de gravure sont proposés avec cet appareil : Cryo et Bosch.

5.5.2 Types de gravure DRIE

5.5.2.1 Gravure CRYO

Le procédé de gravure DRIE de type Cryo est produit à une température variant de

-100 à -150 °C. Les gaz utilisés dans ce procédé sont du SF_6 et de l' O_2 . Ce procédé est très sensible aux variations de température et aux impuretés qu'on pourrait retrouver sur la plaque. Si ces 2 conditions ne sont pas respectées, on risque d'avoir une détérioration du profil et du fond de gravure. Il est recommandé de ne pas utiliser plus de $1,5\mu\text{m}$ de photorésine lorsqu'on utilise un procédé Cryo. Au dessus de cette épaisseur, elle pourrait craquer sous la basse température. En effet, il est important de faire un recuit sur la photorésine avant les gravures Cryo. Sachant que la sélectivité de ce procédé est de 100:1 et que nous voulons graver $200\mu\text{m}$ de silicium, une épaisseur de $1,5\mu\text{m}$ de photorésine ne serait pas suffisante pour notre gravure.

5.5.2.2 Gravure Bosch

Le procédé de gravure DRIE de type Bosch peut être réalisé à température ambiante. Les gaz utilisés dans ce procédé sont du C_4F_8 et du SF_6 . Ce procédé est une suite de succession de 2 étapes : la passivation et la gravure (Figure 5.24). La passivation consiste à déposer une couche conforme de C_4F_8 par Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) [14] afin de protéger les flancs de gravure et d'augmenter la sélectivité de la photorésine. La gravure consiste dans un premier temps à dépassiver la surface à graver puis à graver la surface dépassivée par un bombardement des ions F^* radicaux du gaz SF_6 sur le substrat de silicium. Les multiples successions de gravure isotrope et de passivation créent des *scallopings* [33] au niveau des flancs de gravure (Figure 5.25). La vitesse de gravure se situe à $\leq 10,0\mu\text{m}/\text{min}$ et la sélectivité de la gravure avec de la photorésine est de 75:1. Le meilleur rapport de forme que l'on peut obtenir est $1\mu\text{m}$ de large pour $30\mu\text{m}$ de profond. La vitesse de gravure est inversement proportionnelle au rapport de forme. Afin d'obtenir des profondeurs intéressantes de motifs, on utilise des photorésines épaisses comme la SPR220. Malgré le *scalloping*, cette technique de gravure profonde est plus appropriée à nos micromoteurs électrostatiques. Nous utiliserons donc cette méthode pour la fabrication de nos micromoteurs.

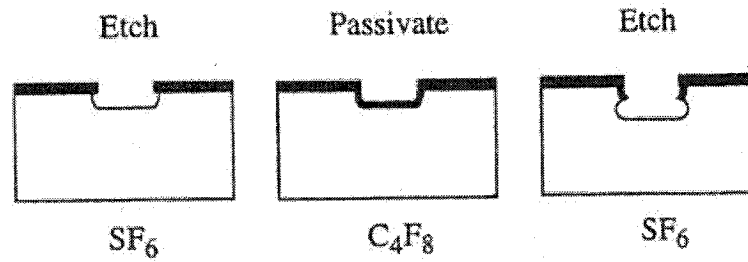


Figure 5.24 : Succession de gravure et de passivation [34]

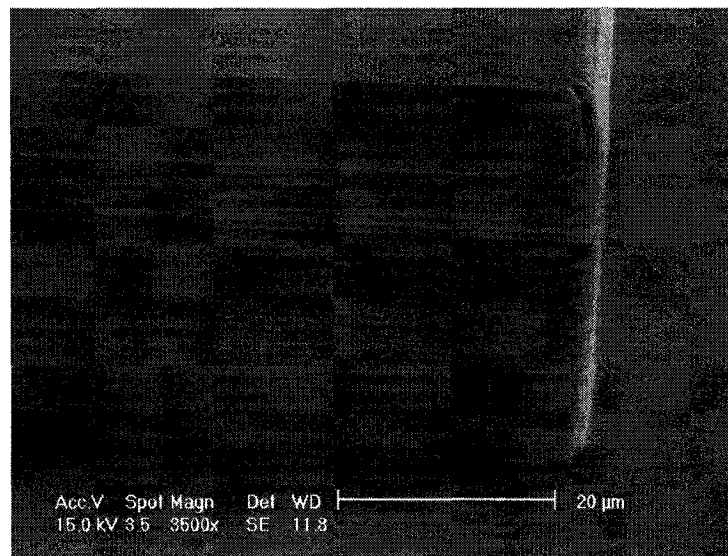


Figure 5.25 : Scalloping lors d'une gravure

5.5.2.3 Écran de contrôle de l'ICP

Le contrôle de l'ICP se fait à partir d'un ordinateur externe. Cet ordinateur permet de contrôler plusieurs paramètres: le temps de l'étape, la pression dans la chambre, la température, le débit des gaz, le débit d'hélium derrière le substrat, la puissance de l'ICP (activation des ions réactifs) et la puissance RF (direction des ions réactifs). Afin de produire une recette complète, on peut définir toutes ces étapes dans la section *recipe* du programme.

5.5.3 Développement du procédé

5.5.3.1 Influence du conditionnement de la chambre

Le conditionnement de la chambre est essentiel afin d'obtenir des procédés de gravure répétables. Lors de la gravure DRIE Bosch, un dépôt de polymère C_xF_y se crée sur les flancs de la chambre (Figure 5.26). Si ce dépôt est laissé dans la chambre, celui-ci risque d'interférer dans les réactions chimiques lors de la gravure et nuire à la qualité de gravure. Afin de garder la chambre propre (Figure 5.27), un procédé de conditionnement est produit après chaque gravure Bosch. Ce procédé de conditionnement se fait avec une gaufre de silicium à nu afin de protéger le porte substrat. La première étape du conditionnement consiste à produire un plasma de SF_6 afin de graver les différents dépôts présents sur les parois de la chambre. Par la suite, un plasma d'oxygène à haute puissance est produit afin de finaliser le nettoyage. Ce procédé permet d'obtenir une chambre de gravure favorable à la reproductibilité des procédés de gravures.

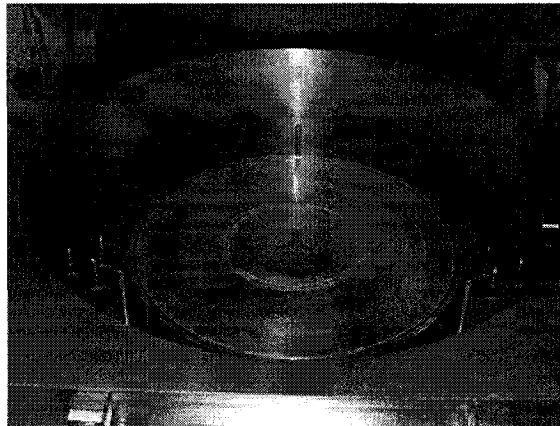


Figure 5.26 : Chambre de gravure sale

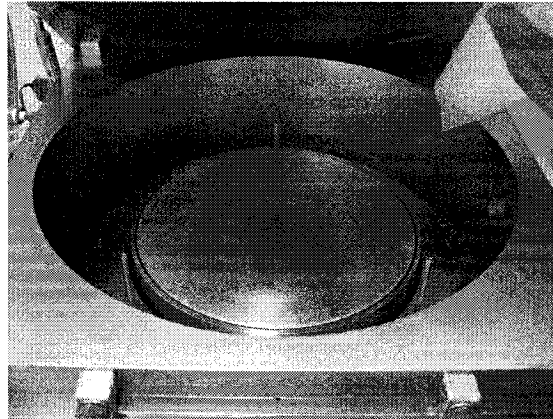


Figure 5.27 : Chambre de gravure propre

5.5.3.2 Temps de passivation vs temps de gravure

Afin d'obtenir la gravure la plus directionnelle possible, il faut équilibrer les temps de gravure en fonction des temps de passivation. Si le temps de gravure est trop élevé par rapport au temps de passivation, le profil des flancs des structures sera légèrement négatif. De plus, un temps de gravure trop élevé produit un effet de *scallop* plus important sur les flancs. Si le temps de gravure est trop bas par rapport au temps de passivation, le profil des flancs sera légèrement positif ou il n'y aura aucune gravure à cause du manque de temps de bombardement des ions afin d'ôter la passivation.

5.5.3.3 Influence de la pression

La pression dans la chambre a une grande influence sur l'anisotropie de la gravure. Plus la pression sera basse, plus la gravure sera anisotrope. Cette basse pression est limitée par le fait que sous de trop basses pressions, le plasma risque de s'éteindre. De plus, la baisse de pression diminue la vitesse de gravure. Sur la Figure 5.28, les flancs de gravure sont moins bien définis que sur la Figure 5.29. Ceci s'explique par le fait que la Figure 5.28 est le résultat d'une gravure à 30mTorr et la Figure 5.29 est le résultat d'une gravure à 20mTorr.

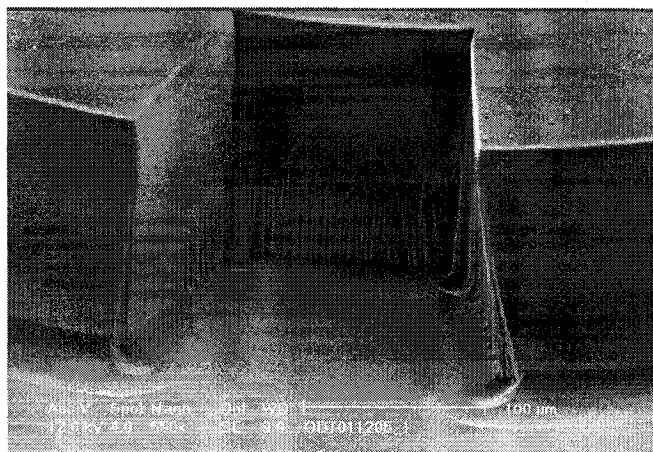


Figure 5.28 : Gravure à une pression de 30mTorr

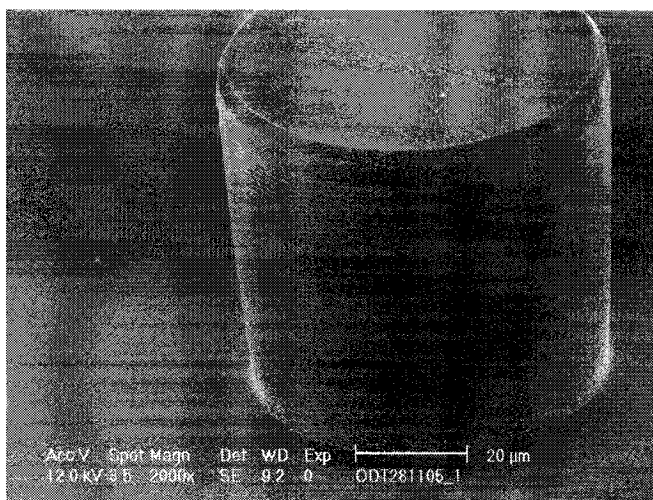


Figure 5.29 : Gravure à une pression de 20mTorr

5.5.3.4 Influence de la quantité de gaz

Une bonne quantité de gaz est nécessaire dans la chambre afin d'avoir un renouvellement des espèces une fois la réaction chimique produite. Si la quantité de gaz est trop faible, il manquera des espèces réactives et on aura une sous gravure qui ne répond pas à nos attentes.

5.5.3.5 Influence de l'hélium au dos de la plaque

Lors du procédé DRIE, le plasma chauffe l'échantillon. Cette augmentation de température peut influencer les étapes du procédé. À la passivation, le C_4F_8 se dépose par condensation sur la structure en silicium. Si la température augmente, cette déposition sera moins épaisse et moins uniforme. C'est pour cette raison qu'un jet d'hélium assure un transfert thermique entre la plaque et le porte échantillon afin de maintenir à température la gaufre de silicium lors de la gravure. Ce refroidissement permet de garder l'échantillon à température ambiante et d'avoir une bonne condensation lors de la passivation.

5.5.3.6 Influence de la puissance ICP

La puissance ICP détermine le taux d'ionisation dans le plasma créé. Lorsque la puissance ICP augmente, le taux d'énergie du plasma augmente. La vitesse de gravure est proportionnelle à la puissance de l'ICP. Si cette énergie est trop grande, les ions réactifs qui bombarderont la surface de silicium créeront une détérioration des structures.

5.5.3.7 Influence *Bias Voltage*

Le *bias voltage* détermine la différence de potentiel entre le plasma haute densité et l'échantillon. Cette différence de potentiel détermine la force de bombardement avec laquelle les ions réactifs arrivent sur le substrat de silicium. Si le *bias voltage* est nul, la gravure sera de type chimique isotrope. Si le *bias voltage* est trop élevé, la gravure sera beaucoup plus par bombardement mécanique que par réaction chimique. Un *bias voltage* crée des profils négatifs de gravure. Afin d'obtenir une gravure anisotrope et directionnelle, il faut trouver le bon *bias voltage* afin que le bombardement mécanique compense la réaction chimique isotrope.

5.5.3.8 Surface à graver sur l'échantillon

La surface totale à graver sur l'échantillon influence la vitesse de gravure. Plus il y a de surface totale à graver, plus la gravure sera longue et vice versa. Pour ce qui est de la grosseur des motifs, plus les motifs sont gros, plus ils sont gravés rapidement. Dans le procédé pour les micromoteurs électrostatiques, la vitesse de gravure au centre du rotor est plus lente que l'aire ouverte autour du rotor.

5.5.4 Recette utilisée

Voici la recette utilisée afin d'obtenir la gravure des micromoteurs électrostatiques :

- Nombre de répétition de la passivation et de la gravure : 260 fois;
- Pression lors de la gravure : 20mTorr;
- Puissance du plasma ICP : 450W;
- Température de la chambre : 20°C;
- Débit d'hélium derrière l'échantillon : 11 sccm.

Passivation :

- Débit du SF_6 : 1 sccm;
- Débit du C_4F_8 : 50 sccm;
- Puissance RF : 0 W;
- Durée de l'étape : 11 sec.

Gravure :

- Débit du SF_6 : 50 sccm;
- Débit du C_4F_8 : 1 sccm;
- Puissance RF : 25 W;
- Durée de l'étape : 11 sec.

5.6 Décollage de la résine

5.6.1 Description

Une fois la gravure profonde effectuée, il faut retirer la résine de la surface du microsystème. Cette résine est difficile à décoller car elle a été recuite durant la gravure DRIE. Toutefois, ce décollage de la résine est essentiel car il permet une meilleure connexion électrique avec les pointes de tests lors des tests électriques.

5.6.2 Fonctionnement

L'acétone est utilisé afin de décoller la résine de sur l'échantillon. On met l'échantillon dans un bain d'ultrasons pour accélérer le décollage de la résine. Une fois la résine décollée, on rince l'échantillon avec du 2-propanol afin de faire disparaître les résidus d'acétone. Finalement, on rince l'échantillon à l'eau DI afin de le décontaminer des traces de 2-propanol.

5.6.3 Recette utilisée

Voici la procédure suivie pour décoller la résine :

- Remplir un vase de pyrex avec de l'acétone;
- Mettre l'échantillon dans le vase d'acétone;
- Mettre le vase d'acétone dans un bain d'ultrason;
- Mettre en marche le bain d'ultrasons pour 5 minutes;
- Retirer l'échantillon du bain d'acétone;
- Rincer l'échantillon au 2-propanol;
- Rincer à l'eau DI;
- Sécher à l'azote.

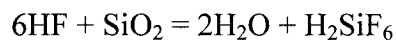
5.7 Gravure Chimique de l'oxyde de silicium

5.7.1 Description

Afin de libérer les rotors du substrat de silicium d'une SOI, la couche d'oxyde de silicium (SiO_2) qui se situe sous les rotors est gravée. La couche d'oxyde qui se trouve à la surface des stator est gravée afin d'obtenir la surface bien plane du silicium. On grave cet oxyde de silicium avec une solution contenant du HF.

5.7.2 Fonctionnement

Pour graver le SiO_2 de l'échantillon contenant les rotors et les stators des moteurs électrostatiques, l'échantillon est mis dans un bécher de téflon contenant une solution de HF. En effet, contrairement au téflon, le verre ou le pyrex sont attaqués par le HF, d'où l'importance de ne pas utiliser des béchers ou contenants faits de ces matériaux. La gravure du SiO_2 par le HF se fait grâce à la réaction chimique suivante :



5.7.3 Développement de procédé

5.7.3.1 Mélange utilisé

Pour la gravure du SiO_2 , 2 mélanges peuvent être intéressants : une solution de HF 49% ou une solution de « Buffered HF » (BHF) de HF 49% avec NH_4F (1:5). Le BHF est intéressant car il permet de préserver plus longtemps la résine de masquage sur l'échantillon lors de la gravure du SiO_2 comparativement au HF qui fait décoller la résine des échantillons. Le désavantage du BHF est que le temps de gravure est beaucoup plus lent que celui du HF 49% (Taux de gravure : BHF = 100-500 nm/min ; HF 49% 20-2000 nm/min) [35]. Dans le cas de nos micromoteurs électrostatiques, il n'y

a aucune importance à garder la résine sur les échantillons. Le HF 49% a été utilisé afin de gagner du temps.

5.7.3.2 Temps de gravure du SiO₂

Pour graver nos échantillons, la solution de HF de la compagnie J.T.Baker est utilisée. Avec cette solution, la couche de SiO₂ de 1µm des SOI a été gravée en 60 secondes. Ceci indique que la solution de HF 49% de la compagnie J.T.Baker à un taux de gravure de 1000nm/min. Pour la libération des rotors, il faut laisser le HF aller graver le SiO₂ en dessous des structures de rotor. Afin d'être sûr que les structures sont bien libérées, l'échantillon est laissé dans le HF 49% pendant une période de 4 heures. Cette longue période n'affecte pas le silicium car le HF 49% grave le silicium à une vitesse de moins de 1 nm/min. Dans le pire des cas, les dimensions des structures sont réduites de 240nm. Comparativement à la résolution de la photolithographie obtenue avec la résine SPR220, une sur-gravure de 240nm du silicium n'affecte aucunement notre design.

5.7.4 Recette utilisée

- Pour les électrodes du stator :
 - Mettre l'échantillon pendant 60 secondes dans un bécher de téflon contenant du HF 49%;
 - Rincer à l'eau DI;
 - Déposer dans un bain d'eau pendant 5 minutes;
 - Sécher à l'azote.
- Pour les rotors :
 - Mettre l'échantillon pendant 4 heures dans un bécher de téflon contenant du HF 49%;

- Rincer à l'eau DI;
- Déposer dans un bain d'eau pendant 5 minutes;
- Sécher à l'azote.

5.8 Manipulation pour l'assemblage du micromoteur

5.8.1 Description

Une fois les rotors libérés du SiO_2 de la SOI, ils sont assemblés avec les stators du micromoteur. Pour ce faire, une technique d'assemblage très précise est utilisée. Plus la technique d'assemblage sera efficace, plus le moteur pourra développer un couple moteur élevé. Il faut se rappeler que la précision d'assemblage du rotor avec le stator détermine le gap minimum entre les palmes du rotor et les électrodes du stator.

5.8.2 Fonctionnement

Pour assembler les micromoteurs électrostatiques de manière précise, un micropositionneur 3 axes de la compagnie Infinity Scientific est utilisé (Figure 5.30). Ce micropositionneur possède une pointe de verre à son extrémité. Il est accompagné d'un microscope optique de modèle A-Zoom2 de la même compagnie (Figure 5.31). Le micro positionneur possède une résolution d'environ $1\mu\text{m}$ de déplacement. À défaut de ne pas avoir de micro pince, une pointe de verre que l'on charge électrostatiquement est utilisée afin de déplacer les rotors pour l'assemblage des micromoteurs.

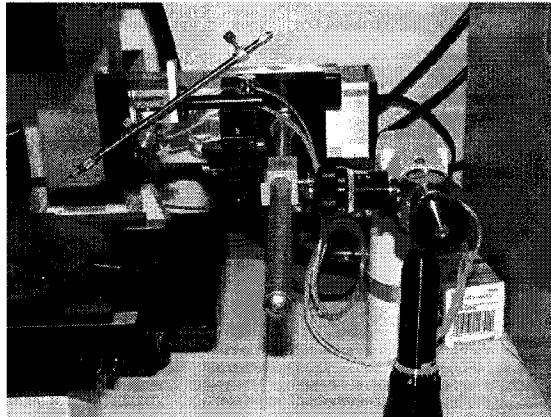


Figure 5.30 : micropositionneur avec la pointe de verre

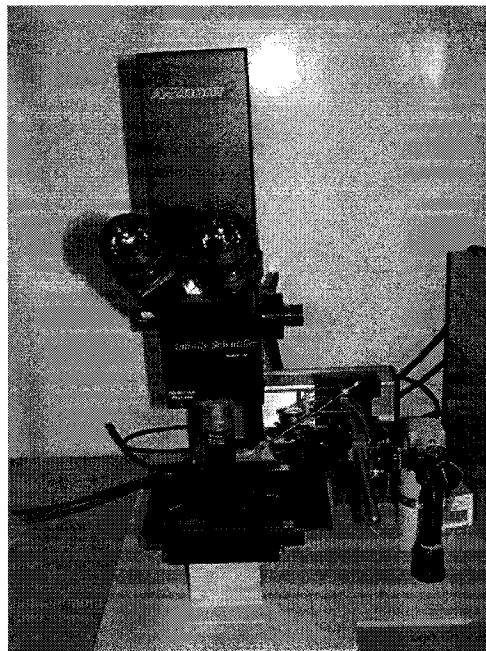


Figure 5.31 : Microscope A-Zoom2

5.8.3 Assemblage

Le rotor est pris à l'aide d'une pointe de verre chargée. La pointe est chargée par frottement sur un tissu synthétique. Par la suite, un rotor est touché avec cette pointe de verre afin que l'effet de la statique attache le rotor à la pointe. Le rotor est déposé sur la gaufre de silicium proche des stators. Finalement, le rotor est déplacé à l'aide d'une pointe de verre sur le micromanipulateur jusqu'à qu'il soit bien imbriqué avec le stator.

5.9 Conclusion

Le développement des différents procédés de microfabrication a permis de concevoir les micromoteurs électrostatiques avec succès (Figure 5.32). Une fois les moteurs assemblés, il ne reste plus que les tests électrique à effectuer à l'aide d'une station de test.

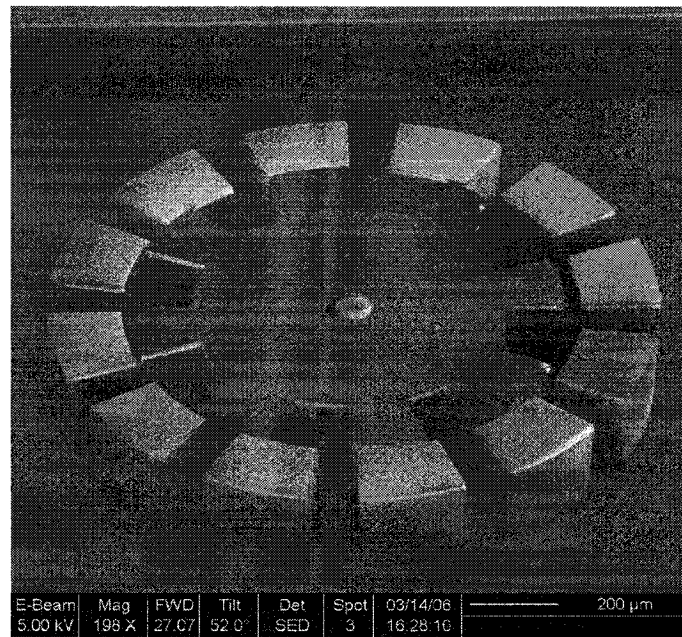


Figure 5.32 : Assemblage final du micromoteur électrostatique

Chapitre 6 : Résultat

6.1 Microfabrication des micromoteurs électrostatiques

Après l'assemblage des micromoteurs électrostatiques, la vérification des dimensions des micromoteurs électrostatiques est l'étape suivante. À première vue sur le micromoteur modèle 4.3 (voir Tableau 5.2), les flancs des rotors et des électrodes semblent bien droits. Par contre, lorsque le rotor est à l'envers, une légère pente négative de $1,5^\circ$ est observée sur les flancs du rotor (Figure 6.1). Cette pente est d'environ $10\mu\text{m}$ sur une hauteur de $200\mu\text{m}$.

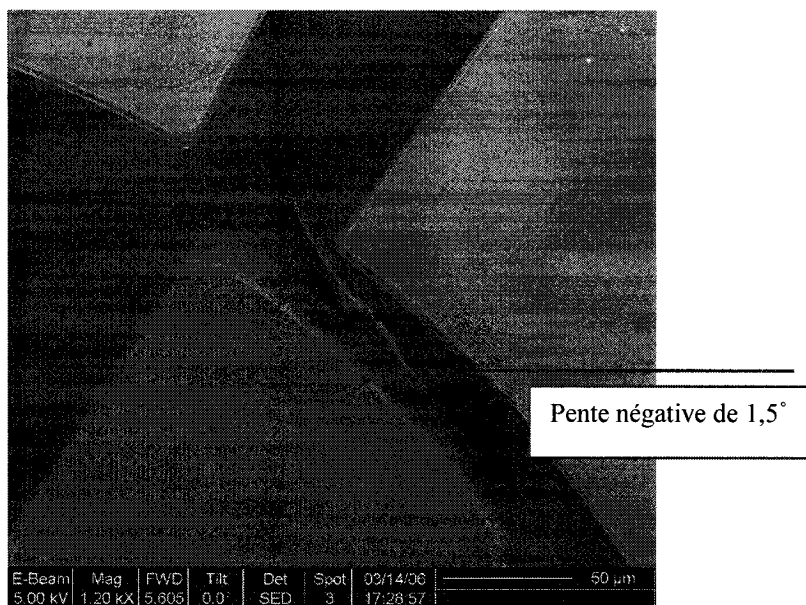


Figure 6.1 : Flancs de gravure du modèle 4.3

Les dimensions entre les micromoteurs fabriqués et théoriques sont différentes dues à la pente négative de $1,5^\circ$ et à la résolution de la photolithographie. La résolution de la fabrication des micromoteurs est d'environ $12\mu\text{m}$.

6.2 Tests sur les nouveaux micromoteurs électrostatiques

6.2.1 Montage expérimental

Les nouveaux micromoteurs électrostatiques ont été testés avec une station de test de la compagnie Microzoom (Figure 3.2) et un générateur de tension DC modèle Harrison 6521A DC Power Supply (Figure 3.1). La station de test est constituée de cinq pointes de test de tungstène qui peuvent être déplacées selon les axes X , Y et Z à l'aide de vis micrométriques. Quatre pointes de test ont été utilisées pour l'alimentation des électrodes et une pointe de test est utilisée afin de produire la mise à la terre, à partir du plancher, du rotor. La Figure 6.2 démontre le schéma du montage.

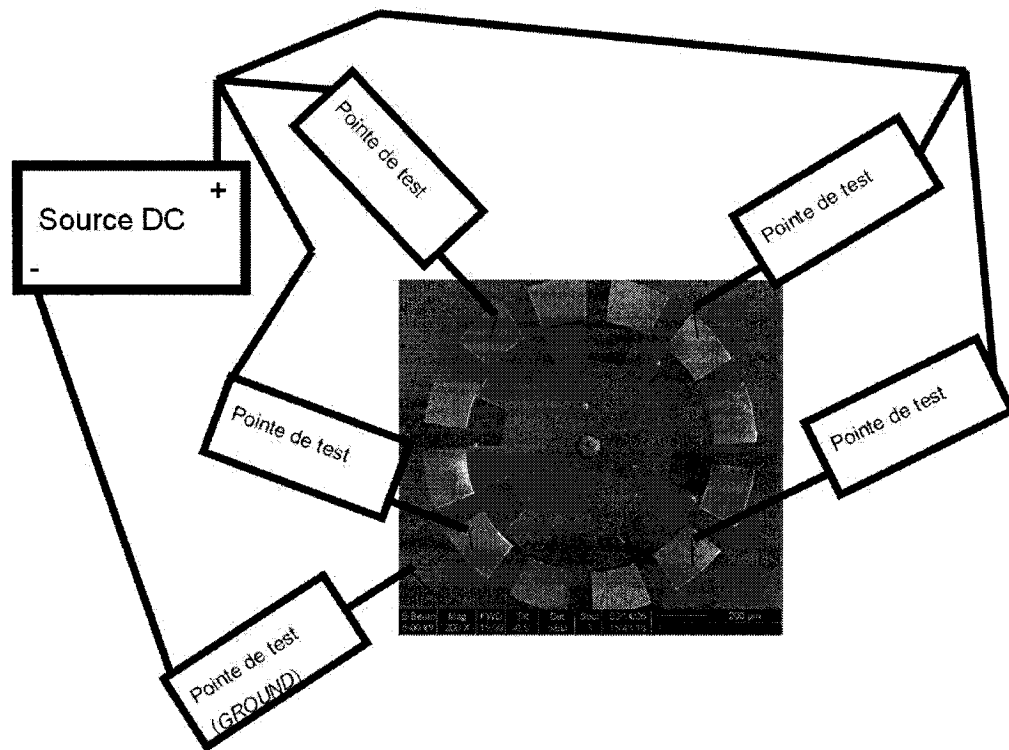


Figure 6.2 : Schéma du montage de test

6.2.2 Résultats des tests électriques

Le premier test a été effectué sur le micromoteur électrostatique modèle 4.3 (Figure 6.3). Afin de déterminer si ce micromoteur fonctionnait, une augmentation

progressivement de la source de tension par des incréments de 10V a été produite. À 300 V, un claquage dans l'oxyde a produit un court circuit sur le moteur électrostatique (Figure 6.4). La Figure 6.5 démontre bien que le micromoteur a brûlé avant de faire le moindre mouvement. La même procédure a été effectuée sur le micromoteur électrostatique modèle 4.3. Ce micromoteur a brûlé à 250V et aucun mouvement n'a été aperçu. La principale hypothèse pour expliquer ce résultat est la friction créée par la grande force de capillarité entre le rotor et le stator.

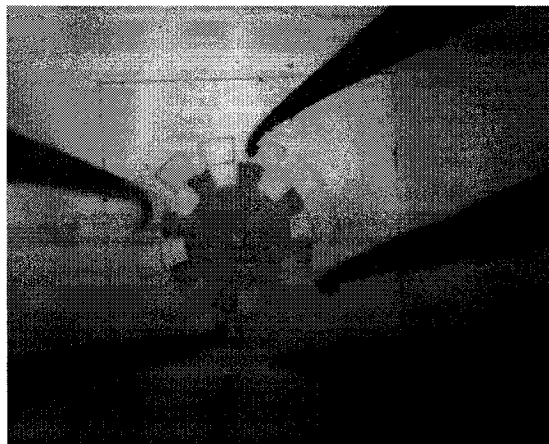


Figure 6.3 : État initiale du modèle 4.3

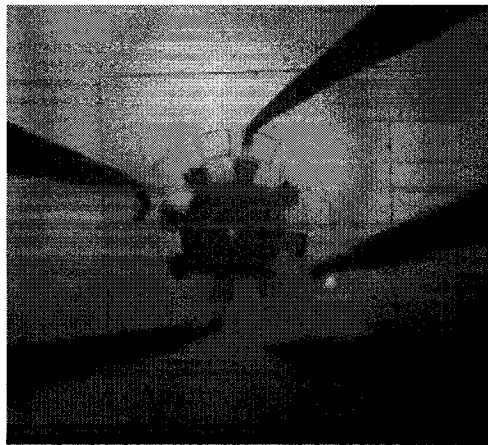


Figure 6.4 : Claquage électrique du modèle 4.3

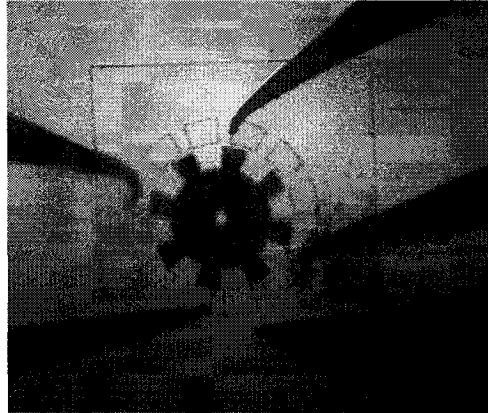


Figure 6.5 : Modèle 4.3 brûlé

Afin de remédier ce problème et de valider notre hypothèse, des tests sur le micromoteur électrostatique modèle 3.3 (Figure 6.6) ont été fait avec la même procédure que pour les modèles 4.4 et 4.3. Afin de faire décoller le rotor du stator lors de l'application de la tension, des coups réguliers de pinces à gaufre ont été effectué sur le porte échantillon de la station de test. Lorsque la tension a atteint 110V, le rotor a fait un pas dans le sens horaire (Figure 6.7). Les légères vibrations amenées ont aidé à faire décoller le rotor du stator et ainsi faire fonctionner le micromoteur électrostatique.

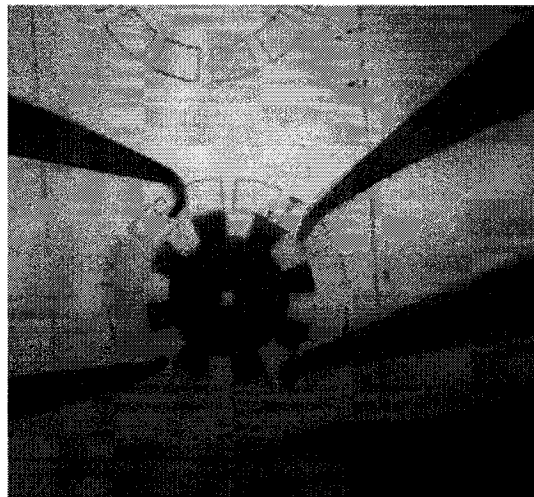


Figure 6.6 : État initiale du modèle 3.3

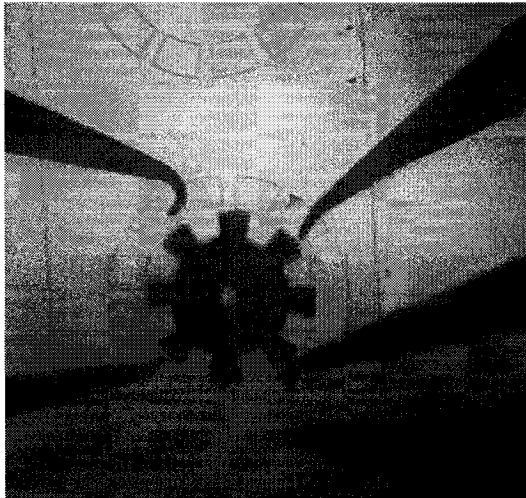


Figure 6.7 : Mouvement d'un pas dans le sens horaire

Discussion

Les tests effectués sur les nouveaux micromoteurs électrostatiques confirment l'hypothèse d'une trop grande force de friction par capillarité entre le rotor et le stator. La légère vibration apportée au micromoteur a aidé à combattre cette friction et a permis de faire tourner le micromoteur à 110V. La pente négative de $1,5^\circ$ des flancs des micromoteurs et la résolution de la photolithographie de $2\mu\text{m}$ diminue l'efficacité des micromoteurs en augmentant la distance entre le rotor et les électrodes selon l'Eq 2.6. Il serait important, lors du deuxième développement, d'obtenir des flancs de gravure totalement droit et d'améliorer la résolution de la lithographie à $1\mu\text{m}$ afin d'obtenir la totalité de l'efficacité du micromoteur. Il serait primordial de produire des *dimples* sous les rotors afin que la force de capillarité entre le rotor et le stator soit à son minimum. Le troisième développement consisterait à produire le rotor avec la roue de manière monolithique afin d'obtenir une plus grande efficacité du moteur en profitant de la force *side-drive* et de la force *top-drive*. Pour le premier développement de ce nouveau moteur, il est impossible de calculer la vitesse de déplacement ou le couple moteur des micromoteurs électrostatiques. La légère vibration apportée au porte échantillon, lors des tests, apporterait des variations de mouvement au microsystème et induirait en erreur au système de mesure. Afin de minimiser les frictions entre le rotor et le stator, il serait intéressant d'étudier la possibilité de déposer une couche d'un polymère ayant un faible coefficient de friction [36] sur le rotor.

Conclusion

L'évolution de la structure du WalkingDie et la preuve de concept de la nouvelle version du micromoteur électrostatique ont remis le projet WalkingDie sur la bonne voie. La fabrication et la preuve de fonctionnement de ce nouveau micromoteur électrostatique ont démontré que le nouveau *design* de l'actionneur peut être intégré dans le WalkingDie. Une deuxième fabrication des nouveaux micromoteurs électrostatiques permettrait de savoir si le projet est prometteur ou non viable. Ce micromoteur pourrait aussi être utilisé dans le domaine du génie biomédical et de l'horlogerie.

Cette fabrication de micromoteurs a permis de développer certains procédés en microfabrication à l'École Polytechnique de Montréal et de développer une expertise importante des microsystèmes dans le Laboratoire de Nanorobotique.

Références

- [1] TRUONG, O.-D., Kaou, N., and Martel, S., "Integration of MEMS with a SoC in a microrobot," *The 3rd International IEEE-NEWCAS Conference, 19-22 June 2005*, pp. 75-8, 2005.
- [2] EBEFORS, T., Mattsson, J. U., Kalvesten, E., and Stemme, G., "A robust micro conveyer realized by arrayed polyimide joint actuators", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 10, no. 3, pp. 337-49, Sep, 2000.
- [3] KOVACS, G. T. A., *Micromachined transducers sourcebook*, 1st ed., pp. 302, 1998, WCB-McGraw-Hil, Boston, Mass, 0072907223.
- [4] JIANGZHONG, X., Schmidt, J. J., and Montemagno, C. D., "Self-assembled microdevices driven by muscle", *Nature Materials*, vol. 4, no. 2, pp. 180-4, Feb, 2005.
- [5] MINOTTI, P., *Les micromachines*, 1st ed., pp. 62, 1998, Hermès, Paris, 2866017137.
- [6] ZHENBO, L., Jiapin Chen, and Jianzhi Feng, "Design of an omni-directional mobile microrobot (OMMR-I) for a micro-factory with 2 mm electromagnetic micromotors", *Robotica*, vol. 23, pp. 45-9, Jan, 2005-. 0263-5747.
- [7] BYRNE, R. H., Adkins, D. R., Eskridge, S. E., Harrington, J. J., Heller, E. J., and Hurtado, J. E., "Miniature mobile robots for plume tracking and source localization research", *Journal of Micromechatronics*, vol.1, no.3, pp. 253-61, 2002.
- [8] DARIO, P., Carrozza, M. C., Stefanini, C., and D'Attanasio, S., "Mobile

- microrobot actuated by a new electromagnetic wobble micromotor", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 3, no. 1, pp. 9-16, 1998.
- [9] DUBOIS, M.-A. and Muralt, P., "PZT thin film actuated elastic fin micromotor" , *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 45, no. 5, pp. 1169-77, Sep, 1998.
- [10] MARTEL, S. and Hunter, I., "Piezo-drive circuits for amplitude modulated locomotion for miniature wireless robots," *Microrobotics and Microassembly III, Oct 29-30 2001*, pp. 199-209, 2001.
- [11] BERGANDER, A., Driesen, W., Lal, A., Varidel, T., Meizoso, M., Bleuler , H., and Breguet, J.-M., "Position feedback for microrobots based on scanning probe microscopy," *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 28 Sept.-2 Oct. 2004*, pp. 1734-9, 2004.
- [12] SEYFRIED, J., Szymanski, M., Bender, N., Estana, R., Thiel, M., and Worn, H., "The I-SWARM project: Intelligent small world autonomous robots for micro-manipulation," *SAB 2004 International Workshop, Jul 17 2004*, pp. 70-83, 2005.
- [13] ESTANA, R., Szymanski, M., Bender, N., and Seyfried, J., "Towards a real micro robotic swarm," *Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence. 4th International Workshop, ANTS 2004. Proceedings, 5-8 Sept. 2004*, pp. 406-13, 2004.
- [14] MADOU, M. J., Fundamentals of microfabrication, Second Ed., pp. 547;28;148, 2002, CRC Press, Boca Raton, Florida, 0849394511.
- [15] DONALD, B. R., Levey, C. G., McGray, C. D., Paprotny, I., and Rus, D., "An untethered, electrostatic, globally controllable MEMS micro-robot" , *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 1-15, Feb,

2006.

- [16] KANAMORI, Y., Aoki, Y., Sasaki, M., Hosoya, H., Wada, A., and Hane, K., "Driving of optical fiber by surface-micromachined cam-micromotor for the applications to variable optical attenuator," *2003 IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS, 18-21 Aug. 2003*, pp. 119-20, 2003.
- [17] KOVACS, G. T. A., Maluf, N. I., and Petersen, K. E., "Bulk micromachining of silicon", *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 8, pp. 1536-1551, 1998.
- [18] AZZAM YASSEEN, A., Mitchell, J. N., Klemic, J. F., Smith, D. A., and Mehregany, M., "A rotary electrostatic micromotor 1×8 optical switch", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 5, no. 1, pp. 26-32, Jan, 1999.
- [19] BAO, M., Analysis and design principles of MEMS devices, 1st ed., pp. 175-178, 2005, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 0444516166.
- [20] PolyMUMPs design handbook Compiled by : MEMSCAP. ver. 10, 2003.
- [21] DELAFOSSE, M. J. A., Conception, fabrication, caractérisation et test d'un micromoteur MEMS 2004. École Polytechnique de Montréal (EPM).
- [22] CARON, A., Analyse Mécanique prototype Beta-EDM-30M. 2004. École Polytechnique de Montréal (EPM).
- [23] ANDRÉ, W., Projet WalkingDie 2004. École Polytechnique de Montréal (EPM).
- [24] NETMOTION, 2003, Wire bounding capillary, en ligne, http://www.netmotion.com/htm_files/ot_ruby.htm, (page consultée le 27/Mar./2006).

- [25] RASMUSSEN, F. E., Frech, J., Heschel, M., and Hansen, O., "Fabrication of high aspect ratio through-wafer vias in CMOS wafers for 3-D packaging applications," *IEEE International Solid-State Sensors and Actuators Conference*, 8-12 June 2003, pp. 1659-62, 2003.
- [26] MARTEL, S., "Magnetotactic phage-based microrobotic systems for the detection of live bacteria," *Biorob 2006*, Pisa, Italia.
- [27] CMI-EPFL, 15/2/2006, Mask design, en ligne, <http://cmi.epfl.ch/photo/mask.htm>, (page consultée le 27/Mar./2006).
- [28] MICROPOSIT S1800 SERIES PHOTO RESISTS Compiled by : SHIPLEY. Loc. Marlborough, MA, Shipley. Marlborough, MA.
- [29] MEGAPOSIT SPR220 Compiled by : SHIPLEY. Loc. Marlborough, MA, 1999. Shipley. Marlborough, MA.
- [30] BRIGHAM YOUNG UNIVERSITY, 2004, BYU Cleanroom_RIE Etching, en ligne, http://www.ee.byu.edu/cleanroom/rie_etching.phtml, (page consultée le 27/Mar./2006).
- [31] WALKER, J. "Comparison of Bosch and cryogenic processes for patterning high aspect ratio features in silicon", 2001, Bellingham, WAS, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers.
- [32] OXFORD INSTRUMENTS, Plasmalab system 100 for RIE and PECVD, ICP, en ligne, <http://www.oxfordplasma.de/systems/100ll.htm>, (page consultée le 27/Mar./2006).
- [33] MITA, Y., Sugiyama, M., Kubota, M., Marty, F., Bourouina, T., and Shibata, T., "Aspect ratio dependent scalloping attenuation in DRIE and an application to low-loss fiber-optical switches," *MEMS 2006*, Istanbul, Turkey, pp. University of Tokyo.

- [34] SENTURIA, S., *Microsystem design*, pp. 70, 2001, Kluwer Academic Publishers, Boston, 0792372468.
- [35] WILLIAMS, K. R. and MULLER, R. S., "Etch rates for micromachining processing", *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 256-269, Dec, 1996.
- [36] RAVIV, U., Giasson, S., Kampf, N., Gohy, J.-F., Jerome, R., and Klein, J., "Lubrication by charged polymers" , *Nature*, vol. 425, no. 6954, pp. 163-165, 2003