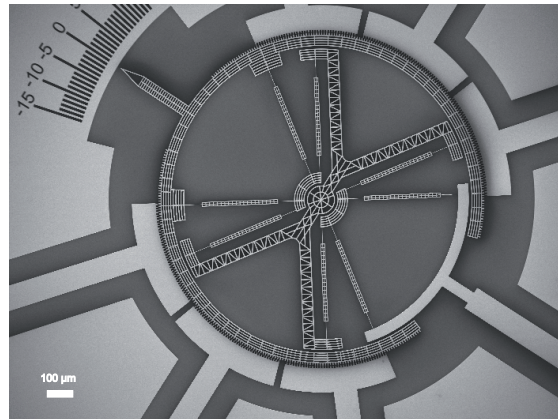


A monolithic microrobotic arm in silicon

Microrobot monolithique en silicium

PROJET DE SEMESTRE (Automne 2009)

Section Microtechnique



Auteur :

Marc STRANCZL

Sous la supervision de :

Prof. Martinus GIJS, LMIS2

Dr. Christophe YAMAHATA, LMIS 2

Remis le : 8 janvier 2010

Table des matières

1	Introduction	5
2	Etat de l’art	7
2.1	Travaux de Simon Henein	7
2.1.1	Conception des guidages flexibles	7
2.1.2	Flexure pivot for aerospace mechanisms [1]	8
2.2	Three-Phase Electrostatic Rotary Stepper Micromotor with a Flexural Pivot Bearing [2]	9
2.3	Single mask 3-phase electrostatic rotary stepper micromotor [3]	11
3	Titre #3	13
4	Titre #4	15
5	Titre #5	17
6	Titre #6	19
7	Titre #7	21
8	Conclusion	23
	Bibliographie	24
A	Annexes	27
A.1	Conception des masques	27
A.2	Constantes physiques et propriétés des matériaux	28
A.3	Contenu du CD-ROM	28
A.4	Processus de fabrication	29
A.5	Protocole du processus de fabrication	29
A.6	Article en cours d’impression : “Three-Phase Electrostatic Ro- tary Stepper Micromotor with a Flexural Pivot Bearing” . . .	29

A.7 Article de la conférence Transducers 2009 : “Single mask 3-phase electrostatic rotary stepper micromotor”	29
---	----

Résumé

Ce document présente la modélisation et la caractérisation expérimentale d'un micromoteur triphasé pas à pas ainsi que l'élaboration d'un bras robotisé basé sur ce micromoteur. Le micromoteur monolithique pivote sur un guidage flexible à lame renforcée de grande rigidité transversale. La structure monolithique, fabriquée en salle blanche avec une technologie SOI¹ à deux masques, évite tout frottement et contact mécanique entre les éléments mobiles et permet donc une rotation répétée. Le mouvement bidirectionnel, précis et fiable du rotor, ne nécessite pas de système de commande à rétroaction. Un modèle mathématique de la rigidité du micromoteur a été établi ainsi que le design d'un robot parallèle à deux degrés de liberté. La caractérisation du micromoteur d'un diamètre de 1,4 mm a démontré une plage de rotation de 30 ° (± 15 °) à une tension d'alimentation de 65V. La réalisation du robot et l'établissement d'un processus de fabrication à un seul masque n'ont pas pu être effectués faute de temps.

1. SOI : *Silicon on Insulator*

Chapitre 1

Introduction

Ce projet a pour but de réaliser un micromoteur implantable dans une tête de lecture de disque dur et d'illustrer ses performances en réalisant un microrobot à deux degrés de liberté. Le micromoteur doit être développé dans une technologie silicium basée sur des wafers SOI avec pour objectif un processus de fabrication à un seul masque. La structure doit être robuste, fiable et précise. La caractérisation du moteur devra ensuite être effectuée afin de déterminer ses propriétés.

La fabrication d'un micromoteur triphasé pas à pas d'une course angulaire de $30^\circ (\pm 15^\circ)$ pour une tension de 65 V a été réalisée. Une structure monolithique, flexible, qui induit une grande rigidité transversale, a été modélisée et implantée dans le moteur. Cette structure permet un mouvement précis, robuste et fiable du micromoteur. La réalisation s'est heurtée à des difficultés techniques et un processus à deux masques a été nécessaire. Le robot élaboré et modélisé n'a pas pu être réalisé faute de temps. Cependant, les perspectives sont très prometteuses.

Nous établirons en premier lieu l'état de l'art au chapitre 2. Le chapitre 3 exposera l'élaboration du micromoteur qui mènera aux modélisations théoriques au chapitre 4. Le dimensionnement du micromoteur sera effectué au chapitre 5 et il sera suivi par le dimensionnement du microrobot au chapitre 6. Les résultats sont regroupés et discutés au chapitre 7. Nous établirons finalement les perspectives futures au chapitre 8.

Chapitre 2

Etat de l'art

Dans ce chapitre, nous allons présenter les travaux antérieurs sur lesquels ce projet se base. Nous allons relever les points pertinents relatifs à l'étude du moteur publication par publication. Ceci ne forme cependant pas un résumé des travaux cités.

2.1 Travaux de Simon Henein

2.1.1 Conception des guidages flexibles

Cet ouvrage décrit les connaissances actuelles au sujet des guidages flexibles. Ce type de liaison mécanique se base sur le principe de la déformation élastique de la matière. Une structure typique, comprenant 16 pivots flexibles, est illustrée à la figure 2.1.

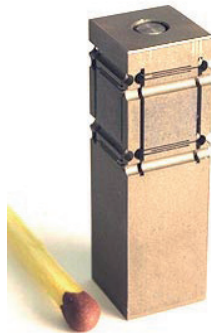


FIGURE 2.1 – Exemple de guidage flexible : table XY monolithique guidée par 16 guidages flexibles

Les guidages flexibles présentent certaines caractéristiques par rapport aux guidages classiques :

- Premièrement, un guidage flexible ne présente aucun frottement. Ce fait a plusieurs répercussions favorables : L'absence d'usure induit aucune émission de poussières. Cela a également pour effet de ne pas induire de risque de grippage et aucune lubrification n'est donc nécessaire. Ces différents points sont particulièrement pertinents pour les composants microtechniques.
- Deuxièmement, les guidages flexibles ne présentent aucun jeu. Les pivots ou guidages sont monolithiques et de par ce fait extrêmement précis dans leur déplacement. Les mouvements de ces guidages peuvent nécessiter un modèle mathématique complexe. Cet inconvénient n'est cependant qu'un problème de modélisation et non de fonctionnement.
- Troisièmement, utiliser la déformation élastique du matériau implique que la course du guidage est limitée. L'énergie est stockée dans le guidage et non dissipée. Le premier point est désavantageux et peut être contourné par une conception géométrique judicieuse [1]. Le deuxième point est un avantage : l'énergie stockée peut être réutilisée.
- Ces guidages présentent, en dernier lieu, une grande rigidité transversale. La rigidité transversale, dans le cas d'un pivot, est par définition la rigidité dans le degré de liberté bloqué.

Nous pouvons déjà constater que les guidages flexibles présentent de nombreux atouts pour notre application. Nous nous sommes donc plus particulièrement penché sur le chapitre 6 "Guidage en rotation".

2.1.2 Flexure pivot for aerospace mechanisms [1]

Cette publication, du même auteur expose le design d'un pivot macroscopique dit "papillon" illustré à la figure 2.2.

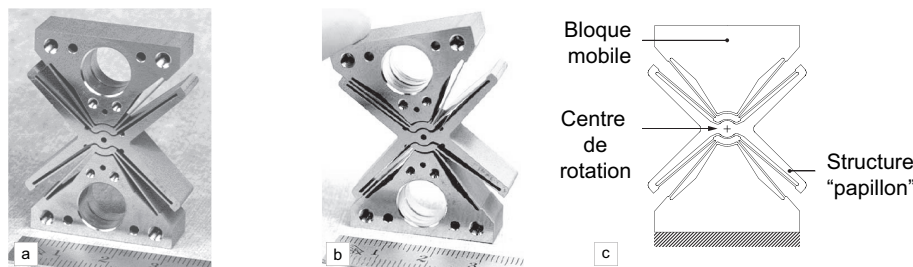


FIGURE 2.2 – Guidage flexible : (a) pivot papillon (b) pivot papillon sous contrainte (c) schéma de la structure

Ce pivot est composé de deux pivots dit "flexibles" en série. Un pivot flexible fait pivoter la structure suspendue autour d'un point de rotation virtuel sur 15° (voir figure 2.3). Il faut noter que le centre de rotation n'est pas exact et est sujet à une variation : le centre de pivotement se déplace de $2\text{ }\mu\text{m}$ pour une longueur de lame de 36.5 mm .

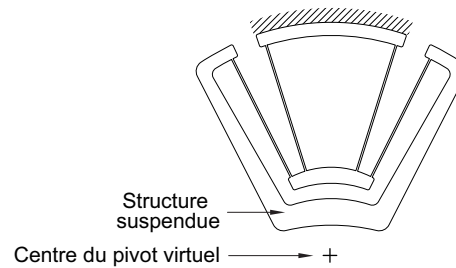


FIGURE 2.3 – Pivot flexible : structure et centre de rotation

2.2 Three-Phase Electrostatic Rotary Stepper Micromotor with a Flexural Pivot Bearing [2]

L'objectif de cet article, annexe ??, est de développer un micromoteur rotatif sur une plage de 30° ($\pm 15^\circ$) afin de l'implanter dans la tête de lecture des disques durs. En effet, un angle entre la tête de lecture et la piste sur le disque diminue la densité de données stockées. Cet angle, *skew angle* en anglais, est illustré à la figure 2.4.

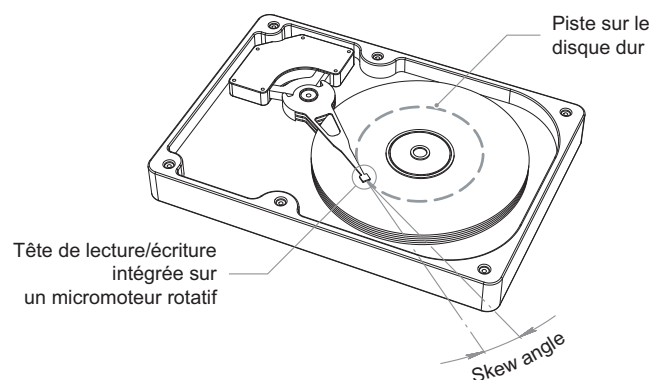


FIGURE 2.4 – Disque dur : "skew angle" entre la piste et la tête de lecture

Le moteur pas à pas a été réalisé avec un processus de fabrication à 5 masques utilisant des wafers en silicium classique. Le stator est composé de 3 phases qui sont réparties sur toute la circonférence. La figure 2.5 indique le principe de fonctionnement du moteur. En (a) nous pouvons observer que le moteur est guidé par des lames dont la structure est très proche du pivot papillon.

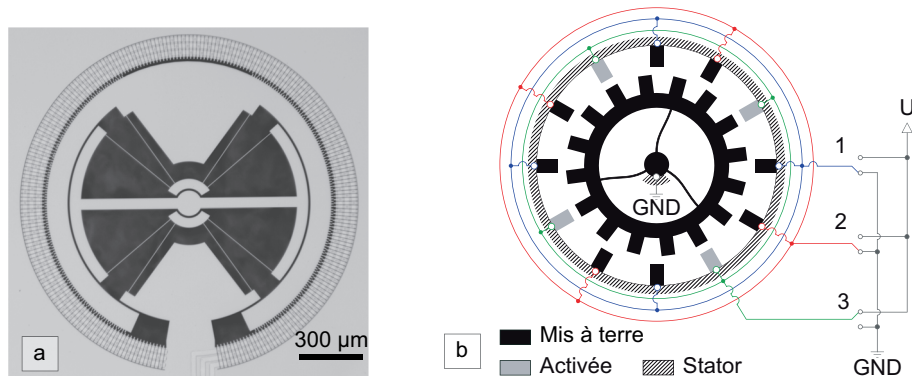


FIGURE 2.5 – Moteur :(a) moteur monolithique (b) schéma équivalent

Les résultats obtenus sont les suivants : un angle de 13° pour une tension de commande de 75 V. Nous pouvons noter que performances sont limitées par des décharges entre les électrodes du stator et les pistes d'alimentation en polysilicium.

Plusieurs suggestions sont émises afin d'améliorer le design :

- Le processus de fabrication est complexe et peut être simplifié par l'utilisation de wafers SOI. Un processus à un seul masque est théoriquement possible. Ceci modifie le design et les décharges électriques qui limitent les performances sont supprimées.
- Un rotor perforé permet de diminuer l'inertie du rotor et une structure en X permet également de diminuer le moment d'inertie de celui-ci.
- Plusieurs approches de modélisation sont également recommandées afin de mieux comprendre et optimiser les paramètres influençant les performances.

Les suggestions géométriques et technologiques servent de bases à la réalisation de ce projet de semestre.

2.3 Single mask 3-phase electrostatic rotary stepper micromotor [3]

Cette publication, en annexe A.7, a été effectuée par les mêmes auteurs et forme la continuité des travaux de la publication précédente. Les moteurs ont été modifiés et ils développent un moment électrostatique généré par 3 phases dont les dents sont regroupées. Le schéma du moteur est présenté à la figure 2.6 (b) et une photo du moteur est illustrée en (a).

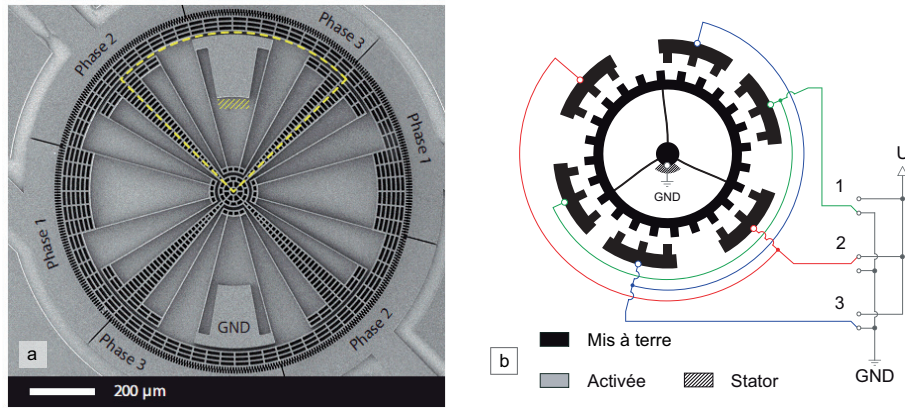


FIGURE 2.6 – Moteur : (a) moteur monolithique (b) schéma équivalent

Le processus structure la couche supérieure de wafers SOI pour libérer le moteur monolithique. Cependant, le substrat n'est pas gravé et la structure libérée doit nécessairement être perforée.

Les résultats obtenus sont en dessous des attentes : 4.2° pour une tension de 45 V. Cette performance est limitée du fait que le rotor se colle au substrat à cause d'une accumulation de charge électrostatique. Le silicium utilisé dans cette réalisation était relativement peu conducteur, ce qui influence également les résultats.

Chapitre 3

Titre #3

Chapitre 4

Titre #4

Chapitre 5

Titre #5

Chapitre 6

Titre #6

Chapitre 7

Titre #7

Chapitre 8

Conclusion

Malgré l'impossibilité de fabriquer et de tester tous les moteurs que nous avons projetés, les résultats nous ont permis de dimensionner et de tester la structure flexible à lame rigidifiée. Nous avons mesuré une performance remarquable : une rotation de $30^\circ (\pm 15^\circ)$ pour une tension de 65V. L'objectif principal a été atteint.

L'expérimentation a démontré que des progrès devront être réalisés dans le processus de fabrication afin que la réalisation de moteurs soit moins complexe. Les performances du moteur pourront évoluer vers une utilisation optimale dans les microrobots modélisés. Cependant ces derniers pourraient être limités par les tolérances de fabrication et les limites technologiques.

Ce premier travail de semestre m'a permis d'utiliser les connaissances acquises lors de mes études et d'aborder les premières difficultés dans la gestion et la réalisation d'un produit dans le cadre d'une recherche académique. Ce projet peut être poursuivi et c'est avec intérêt que je partagerai mon expérience avec l'étudiant qui poursuivra mes travaux.

Marc Stranczl, le 8 janvier 2010.

Bibliographie

- [1] S. Henein. *Conception des guidages flexibles*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Switzerland, 2004.
- [2] E. Sarajlic, C. Yamahata, M. Cordero, and H. Fujita. Three-phase electrostatic rotary stepper micromotor with a flexural pivot bearing, 2010. soon to appear.
- [3] Sarajlic E. Yamahata C. Cordero M. Jalabert L. Iizuka T. Fujita H. Single mask 3-phase electrostatic rotary stepper micromotor. pages 1505–1508, 2009.
- [4] J. Botsis. *Introduction à la mécanique des solides et des structures*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Switzerland, 2004.
- [5] K E Petersen. Silicon as a mechanical material. *Proceedings of the IEEE*, 70(5) :420–457, 1982.
- [6] L-S Fan, Y-C Tai, and R S Muller. IC-processed electrostatic micromotors. In *Tech. Dig. IEEE Int. Electron Devices Meeting (IEDM '88)*, pages 666–669, San Francisco, CA, USA, December 1988.
- [7] S Henein, P Spanoudakis, S Droz, L I Myklebust, and E Onillon. Flexure pivot for aerospace mechanisms. In *Proc. 10th European Space Mechanisms & Tribology Symposium (ESMATS) – European Space Agency Special Publication (ESA SP)*, number 524, pages 285–288, San Sebastian, Spain, 2003.
- [8] E. Sarajlic, C. Yamahata, M. Cordero, and H. Fujita. An electrostatic 3-phase linear stepper motor fabricated by vertical trench isolation technology. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19(7) :074001 (7 pp.), July 2009.

Annexe A

Annexes

A.1 Conception des masques

Le tableau A.1 regroupe les dimensions du masque et les dimensions prévues .

Paramètres	Dimensions	
	sur masque	sur wafer
Largeur des lames souples	$3\mu m$	$2.5\mu m$
Largeur des lames rigides	$2.5\mu m$	$2\mu m$
Largeur d'une dent large	$5\mu m$	$4.5\mu m$
Largeur d'une dent étroite	$4\mu m$	$3.5\mu m$
Gap (rotor/stator)	$1\mu m$	$1.5\mu m$
Largeur des lames du robot v 2.5	$2.5\mu m$	$2\mu m$
Largeur des lames du robot v 2.0	$2.0\mu m$	$1.5\mu m$
Largeur des lames du robot v 1.5	$1.5\mu m$	$1\mu m$
Largeur des lames du robot v 1.0	$1.0\mu m$	$0.5\mu m$

TABLE A.1 – Dimensions des paramètres sur le masque de la deuxième version et dimensions prévues sur wafer

La fabrication et la mise au point du processus de fabrication a été donné à une personne externe. Le lecteur est invité à se référer aux annexes A.4 et A.5 pour le processus en lui-même.

A.2 Constantes physiques et propriétés des matériaux

Les valeurs suivantes ont été utilisées pour les applications numériques. Afin de s'affranchir des propriétés anisotropes du silicium, les valeurs les plus contraignantes de ces propriétés ont été considérées. Un coefficient de sécurité de 10 a été pris pour les contraintes admissibles maximum.

Paramètres	Symboles	Valeurs
Module de Young	E	$160GaOP$
Contrainte admissible	σ_{adm}	$7 \times 10^8 Nm^{-2}$
Permittivité de l'air	ϵ	$8,85 \times 10^{-12} C^2 N^{-1} m^{-2}$

TABLE A.2 – Constantes physiques et propriétés des matériaux

A.3 Contenu du CD-ROM

Le CD-ROM contient les fichiers suivants :

- *Latex* : Rapport du projet de semestre.
- *Matlab* : Programme de traitement d'image pour mesure dynamique.
- *Labview* : Programme de commande du micromoteur.
- *processflow* : Processus de fabrication
- *runcard* : Protocole du processus de fabrication.
- *solidworks* : Conception assistée par ordinateur du moteur.
- *Clwin* : Masques sous format .cif
- *microscopieMEB* : Image prise par Microscopie Electronique à Balayage MEB.
- *Excel* : Traitement des résultats.

A.4 Processus de fabrication**A.5 Protocole du processus de fabrication****A.6 Article en cours d'impression : "Three-Phase Electrostatic Rotary Stepper Micromotor with a Flexural Pivot Bearing"****A.7 Article de la conférence Transducers 2009 : "Single mask 3-phase electrostatic rotary stepper micromotor"**