UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MICROACTUATEUR ÉLECTROTHERMIQUE BISTABLE: ÉTUDE D'IMPLÉMENTATION AVEC UNE TECHNOLOGIE STANDARD CMOS

ISABELLE RESSEJAC
DÉPARTEMENT DE GÉNIE PHYSIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR (Ph.D.)
(GÉNIE PHYSIQUE)
OCTOBRE 2003

© Isabelle Ressejac, 2003.

National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisisitons et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence
ISBN: 0-612-89234-4
Our file Notre référence
ISBN: 0-612-89234-4

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

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

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

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

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

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

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

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

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée:

MICROACTUATEUR ÉLECTROTHERMIQUE BISTABLE:
ÉTUDE D'IMPLÉMENTATION
AVEC UNE TECHNOLOGIE STANDARD CMOS

présentée par: RESSEJAC Isabelle
en vue de l'obtention du diplôme de: Philosophiae Doctor
a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de:

M. FAUCHER Guy, D.Sc., président
M. MEUNIER Michel, Ph.D., membre et directeur de recherche
M. LANDSBERGER Leslie, Ph.D., membre et codirecteur de recherche
M. CURRIE John, Ph.D., membre et codirecteur de recherche
M. MARTINU Ludvik, Ph.D., membre
M. CHEEKE David, Ph.D., membre

Je dédie cette thèse à mes parents, Lily et Jean Ressejac, en témoignage de ma reconnaissance et de ma grande affection, ainsi qu'à la mémoire de mon frère aîné, Pierre Ressejac.

REMERCIEMENTS

Cette thèse finalise cinq années de recherche. Je désire remercier tous ceux qui m'ont soutenue, de près ou de loin, au cours de ce travail de doctorat ainsi que les organismes qui ont financé mes travaux de recherche.

Tout d'abord, je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de recherche, le professeur Leslie M. Landsberger de l'Université Concordia, pour avoir dirigé mes travaux scientifiques. Je le remercie sincèrement pour ses nombreux conseils et son soutien tout au long de mes années de doctorat à l'École Polytechnique. J'aimerais souligner sa grande qualité à encourager ses étudiants, à leur donner confiance et à les aider à développer une autonomie professionnelle. Son importante contribution à cette thèse est d'autant plus remarquable qu'il a débuté comme codirecteur puis a accepté de diriger et de supporter financièrement la recherche d'une étudiante externe à son université.

Je voudrais aussi remercier mon codirecteur de recherche, le professeur John F. Currie, actuellement à l'Université Georgetown de Washington, qui a été mon directeur de recherche au M.Sc.A. (1996-97) et au début de ce projet de doctorat. J'aimerais lui témoigner ma gratitude pour m'avoir fait découvrir le monde des MEMS par le biais de son brevet d'invention d'un micro-administrateur pharmaceutique et pour m'avoir accueillie au sein de son Laboratoire d'Intégration des Senseurs et d'Actuateurs (LISA). Je le remercie également pour m'avoir offert un sujet de thèse qui m'a beaucoup appris, tant du point de vue théorique qu'expérimental, et pour avoir financé une grande partie de mes travaux de recherche.

Je remercie mon codirecteur d'études, le professeur Michel Meunier, du département de génie physique, pour avoir accepté spontanément ce rôle après le départ du professeur J.F. Currie et pour son aide académique lors de mes démarches administratives à l'École Polytechnique. Bien qu'il soit désigné comme directeur de recherche à la page iii (en raison d'un règlement de l'École Polytechnique), il ne s'est pas impliqué dans ce projet de doctorat jugeant que j'étais suffisamment bien supervisée par le professeur L.M. Landsberger. J'aimerais aussi le remercier pour m'avoir confié des tâches d'enseignement de laboratoires en microfabrication ainsi qu'un cours au département de génie physique.

Je tiens à remercier les professeurs Guy Faucher et Ludvik Martinu du département de génie physique ainsi que le professeur David Cheeke du département de physique de l'Université Concordia qui m'ont fait l'honneur d'être respectivement président et membres de mon jury. Ayant déjà fait partie de mon jury prédoctoral, je les remercie pour l'intérêt qu'ils portent à ce travail. J'aimerais remercier tous les professeurs de mon jury d'examen (page iii) pour avoir participé à l'évaluation de cette thèse. Je remercie également le professeur Jean-Jacques Laurin du département de génie électrique pour avoir accepté d'être le représentant du doyen de la faculté des études supérieures.

Mes travaux de recherche ont été financés grâce aux subventions NSERC (National Sciences and Engineering Research Council of Canada) et FCAR (Fonds pour la formation de Chercheurs et l'Aide à la Recherche) de J.F. Currie et L.M. Landsberger. Je remercie la Canadian Microelectronics Corporation (CMC) pour ses subventions ayant permis la fabrication CMOS de mon dispositif. Je remercie également le département de génie physique et le groupe des couches minces (GCM) pour l'aide financière que j'ai reçue pour une partie de mes études.

Ma reconnaissance va au professeur Arthur Yelon pour avoir assuré la direction du laboratoire LISA après le départ du professeur J.F. Currie. Je tiens également à le remercier pour avoir permis la réalisation d'un montage de gravure au XeF_2 et veillé à ce que je dispose des moyens techniques pour effectuer mes recherches. Je remercie sincèrement les personnes qui ont contribué à une partie des travaux présentés dans cette thèse:

- Laurent Isnard, ingénieur responsable des laboratoires LISA et MODFAB, pour son aide et ses conseils techniques en salles blanches, sa contribution au projet Can-MEMS et à l'obtention de micrographies MEB et les discussions scientifiques sur les couches minces. Je le remercie vivement pour le temps qu'il a consacré à lire et corriger minutieusement cette thèse;
- Jacques Lajoie pour son aide avec le montage de gravure au XeF_2 au laboratoire MODFAB et ses conseils sur le système d'adressage microélectronique;
- Souleymane Bah pour son aide technique et ses conseils lors de plusieurs dépôts de platine;
- Robert Antaki pour m'avoir initiée à la microfabrication à mes débuts au laboratoire LISA;
- Stéphane Leclerc pour ses conseils dans l'analyse thermomécanique du microactuateur et la relecture de certaines sections de cette thèse; et
- Lilian Martineau pour sa contribution à la programmation Labview du modèle analytique du microactuateur qui a rendu possible les nombreuses simulations de cette thèse. Je le remercie également pour son aide durant les tests d'actuation et ses corrections sur ce manuscrit.

Ce projet de recherche m'a permis de développer plusieurs collaborations très enrichissantes. Je tiens donc à remercier:

- la CMC dont Richard Wieler, Gail Burgess, Jim Quinn et Shafaat Bazaz pour leur soutien technique durant la conception et la fabrication CMOS du dispositif;
- l'Université Concordia dont Radu Marinescu pour sa participation au projet Can-MEMS ainsi que le professeur Mojtaba Kahrizi et Oleg Grudin pour les discussions sur le micro-usinage;
- le Laboratoire de couches minces des Technologies Novimage dont Ricardo Izquierdo et Louay Degachi pour les gravures au RIE;
- l'Université d'Alberta dont Keith Brown et le professeur Sandy Robinson pour des gravures via un procédé laser;
- le Laboratoire des procédés plasma au génie physique dont Jörg OberstеBerghaus et le professeur Ludvik Martinu pour les mesures par nano-indentation;
- le Laboratoire microsystèmes, du département "Analyses Électroniques" du Centre National d'Études Spatiales (CNES) à Toulouse dont Francis Pressecq et son équipe pour les coupes FIB, les micrographies FESEM et les mesures par nano-indentation ainsi que Sébastien Rigo pour les mesures par profilométrie optique et ses conseils sur l'analyse de contraintes dans les structures multimorphes; et
- l'Institut des matériaux industriels (IMI) du Centre national de recherches Canada (CNRC) à Boucherville dont Dermatonne R. França et Jean-Pierre Monchalin pour les mesures de la fréquence de résonance de mon microactuateur.

À l'École Polytechnique, je remercie le professeur Rémo Masut pour m'avoir confié des tâches d'enseignement de laboratoires en physique des semi-conducteurs. J'adresse mes sincères remerciements au professeur Patrick Desjardins pour ses conseils et son aide dans la recherche d'une source de financement. Je remercie Kostas Piyakis pour la gestion de mon compte informatique et René Taillefer pour ses conseils sur Ansys. En génie électrique, mes remerciements vont au professeur Mohamad Sawan et Réjean Lepage pour m'avoir donné l'accès aux outils CAD de la CMC ainsi qu'à Mathieu Gagnon et Bernard Antaki pour leurs conseils sur Cadence. Je remercie en génie physique: Joël Bouchard pour la réalisation du montage de gravure au XeF_2, Jean-Paul Lévesque pour l'usinage de mes porte-échantillons et Jiri Cerny pour l'entretien des appareils de salles blanches au LISA. Au secrétariat, Lucille Rozon et Lyne Dénommé méritent mes remerciements pour leurs encouragements et leur aide administrative.

J'adresse mes sincères remerciements à Hélène Lafortune (AÉSCP) et Céline Lemire-Mercier (adjointe au registraire) pour leur soutien et leur aide administrative. La défense de thèse ayant été effectuée en vidéoconférence avec l'Université Georgetown de Washington, je tiens également à remercier Henriette Gosselin du service informatique pour son aide technique.

Pour leur amitié et leur soutien, je remercie: Laurent, Jacques, Malvina et Cédric, Mehrnaz et Florent, Bénédicte, Kim Liên et Valérie. Je remercie également Liliane et Auguste Martineau pour leurs encouragements très appréciés.

J'exprime ma plus profonde gratitude à ma famille en France pour m'avoir encouragée et aidée pendant toutes ces années d'études:

- mon frère Michel, ma sœur Marianne et leurs petites familles respectives: Chantal, Amélie et Damien Ressejac ainsi que Michel, Céline et Élodie Franco;
- mes grands-parents, Jeanne et Simon Ressejac ainsi que Mai Thị Chừng et Trần Tấn, en espérant qu'ils soient fiers de leur petite fille;
- et mes parents, Lily et Jean Ressejac, qui m'ont appris à toujours persévérer dans mon travail, à ne jamais me décourager et qui m'ont toujours poussée à aller plus loin. Je les remercie du fond du cœur pour leur soutien indéfectible, des bancs de l'école maternelle Caritas à Saïgon à ceux de l'École Polytechnique de Montréal.

Enfin je remercie infiniment Lilian pour sa patience, sa curiosité scientifique, son soutien moral, ses encouragements et surtout pour sa présence à mes côtés.

RÉSUMÉ

L'objectif général de ce doctorat était d'étudier l'implémentation d'un nouveau type de microactuateur électrothermique. Cet actuateur présente les avantages d'être bistable et de pouvoir être fabriqué au moyen d'un procédé standard CMOS, permettant ainsi l'intégration d'un circuit d'adressage microélectronique sur le même substrat. Les travaux de recherche, présentés dans cette thèse, portent sur les différentes étapes effectuées pour la mise en œuvre de ce dispositif CMOS MEMS: sa conception théorique, sa fabrication avec une technologie standard CMOS, son micro-usinage en post-traitement, sa caractérisation et sa modélisation électro-thermo-mécanique.

Les applications potentielles de ce microactuateur concernent tout d'abord un micro-administrateur pharmaceutique (MAP). Pour cette application biomédicale, le microactuateur permet de libérer des nano-doses de médicaments encapsulés dans des cavités micro-usinées. En télécommunication, il peut être utilisé pour remplacer des commutateurs électromécaniques conventionnels, tels que ceux utilisés en téléphonie, par une matrice de micro-relais, pouvant être commandés à distance.

Pour répondre à ces besoins spécifiques, notre microactuateur est composé de deux bilames adjacents et d'un pad court-circuiteur, intégrés à une structure en porte-à-faux. À l'état ON, le pad court-circuiteur établit un contact électrique avec un pad de surface. Tandis qu'à l'état OFF, l'extrémité du microactuateur se trouve coincée sous une butée. Des séquences spécifiques de chauffage et de refroidissement des bilames permettent à l'actuateur d'effectuer la transition entre ses deux positions stables. Le design innovateur de ce dispositif lui confère l'avantage d'être bistable sans qu'il soit nécessaire d'appliquer une puissance électrique permanente pour conserver son état. Nous avons optimisé son design dans le but de réduire ses dimensions et sa consommation d'énergie électrique tout en permettant les déflexions nécessaires à son actuation. À partir de l'analyse des différents modes de transfert de chaleur, nous avons développé un modèle thermique simple qui permet de déterminer la distribution en température dans les différentes parties du microactuateur, lors du chauffage localisé des bilames, pour un dispositif opérant dans l'air ambiant ou dans le vide.

Un des points clefs pour l'avenir industriel des MEMS concerne leur compatibilité avec les technologies CMOS couramment utilisées pour la fabrication de circuits intégrés (IC). En effet, la fabrication de composants de type CMOS MEMS offre les avantages d'une production de masse à faible coût et la possibilité d'inclure des circuits intégrés sur le même substrat pouvant communiquer directement avec les transducteurs.

Notre dispositif a été conçu et fabriqué en utilisant la technologie Mitel 1,5 µm CMOS et le service Can-MEMS, disponibles via la CMC. Fabriqué de façon monolithique via un procédé standard CMOS, notre microactuateur offre une capacité d'intégration à grande échelle à cause de ses petites dimensions (longueur ~ 1000 µm et largeur ~ 150 µm). Il constitue le composant de base d'une matrice N par N contrôlée par un système d'adressage microélectronique intégré sur le même substrat. Notre microactuateur se compose d'une structure en porte-à-faux en SiO_2 sur laquelle se situent des résistances de chauffage et un pad court-circuiteur en aluminium. La couche de passivation du procédé CMOS recouvre l'ensemble de la structure afin de la protéger lors des étapes de micro-usinage post-CMOS destinées à la libérer du substrat de silicium.

Initialement, une seule technique de micro-usinage au TMAH était utilisée et de longues durées de gravure (> 9 h) étaient nécessaires pour libérer les microstructures. Cependant, la couche de passivation du procédé CMOS ne pouvait pas protéger la couche de métal sous-jacente du TMAH durant un temps suffisant (seulement ~ 1-2 h). Par conséquent, nous avons dû développer une stratégie de micro-usinage avec des durées de gravure plus courtes pour permettre la libération complète des microstructures sans les endommager. Le post-traitement débute par le dépôt (par pulvérisation) d'une couche mince de platine destinée à protéger la butée des gravures subséquentes. La stratégie de micro-usinage est basée principalement sur l'utilisation d'une gravure hybride du substrat avec une première gravure anisotrope au TMAH suivie d'une gravure isotrope au XeF_2. Une dernière étape de gravure au RIE permet de retirer la couche de passivation sur les bilames et le pad court-circuiteur. Le design du microactuateur et les étapes de micro-usinage ont été optimisés de manière à minimiser les temps de gravure tout en augmentant l'efficacité et la reproductibilité des procédés utilisés. La stratégie de micro-usinage optimisée a permis de libérer complètement les microactuateurs en les laissant intacts après le post-traitement.

Après son micro-usinage, le microactuateur libéré a une déflexion naturelle importante avec son extrémité pouvant atteindre une hauteur jusqu'à cent fois supérieure à son épaisseur. Cette déflexion naturelle résulte de la relaxation des contraintes internes dans les couches minces entrant dans la composition du microactuateur. Ces contraintes internes sont intrinsèques au procédé CMOS. Nous avons développé un modèle de la déflexion initiale du microactuateur en fonction des propriétés mécaniques des couches minces et des dimensions de la structure. Le profil de déflexion simulé correspondant à celui caractérisé expérimentalement, nous avons étudié à l'aide de notre modèle l'influence des contraintes internes dans chacune des couches sur la déflexion naturelle de la structure.

Des tests d'actuation ont permis de caractériser la déflexion du microactuateur en fonction du chauffage des bilames (séparément et ensemble). Nous avons développé un modèle analytique d'actuation thermique d'une structure multimorphe à n couches qui tient compte de sa déflexion initiale, et de celle due à l'augmentation de température lors de l'activation électrothermique des bilames. Nous avons appliqué ce modèle analytique à notre microactuateur qui comporte trois couches (SiO_2, Al et passivation) et est constitué de différentes sections (bilames, pad court-circuiteur etc...). Ceci nous a permis de retrouver les mesures expérimentales correspondant à ses profils de déflexion initial et d'actuation thermique en fonction de la puissance électrique appliquée aux résistances de chauffage des bilames. De cette façon, nous avons pu estimer les températures atteintes au cours de nos tests d'actuation. Les résultats obtenus au moyen de simulations par éléments finis (logiciel Ansys) sont en accord avec ceux obtenus via notre modèle analytique. La validation de notre modèle analytique, avec les mesures expérimentales et les simulations par éléments finis, nous permet de prédire les conditions favorables au fonctionnement du microactuateur, selon sa configuration bimorphe ou trimorphe ainsi que pour différentes épaisseurs et contraintes dans les couches minces.

Mots clefs: MEMS, microactuateur électrothermique, bistabilité, procédé CMOS, micro-usinage, gravure anisotrope et isotrope, structure en porte-à-faux, multimorphe, modélisation actuation thermique.

ABSTRACT

The general objective of this Ph.D. thesis was to study the implementation of a new type of eletrothermal microactuator. This actuator presents the advantages to be bistable and fabricated in a standard CMOS process, allowing the integration of a microelectronics addressing circuit on the same substrate. Experimental research work, presented in this thesis, relate to the different steps carried out in order to implement this CMOS MEMS device: its theoretical conception, its fabrication with a standard CMOS technology, its micromachining as a post-process, its characterization and its electro-thermo-mechanical modeling.

Potential applications of this microactuator concern firstly a pharmaceutical micro-dispenser. For this biomedical application, the microactuator allows to release nano-doses of drugs encapsulated in micromachined cavities. In telecommunications, it can be used to replace conventional electromechanical switches, such as those used in telephony, by a matrix of micro-relays which can be remotely controlled.

To meet these specific needs, our microactuator consists of two adjacent bilayers and a short-circuit-pad integrated to a cantilever beam structure. In the ON state, the short-circuit-pad establishes an electrical contact with a surface pad, while in the OFF state, the extremity of the microactuator remains pinned under an abutment. Specific sequences of heating and cooling of the bilayers enable the actuator to make the transition between its two stable positions. The innovative design of this device presents the advantage of having two stable positions with no need for a permanent electric power to keep its current state. We have optimized its design in order to reduce its dimensions and its power consumption while allowing the deflections necessary for its actuation. Analyzing heat transfer modes, we have developed a simple thermal model which allows us to determine the temperature profile on the various parts of the microactuator, during the localized heating of the bilayers, for a device operating in the ambient air or in vacuum.

One of the key points for the industrial future of the MEMS is their compatibility with standard CMOS technologies often used for the fabrication of integrated circuits (IC). Indeed, the fabrication of CMOS MEMS allows mass production at low cost and the possibility to include on the same substrate some integrated circuits that can communicate directly with the transducers.

The device was designed and fabricated by using Mitel 1,5 µm CMOS technology and the Can-MEMS service which are both available via the Canadian Microelectronics Corporation. Fabricated monolithically within a standard CMOS process, our microactuator is suitable for large-scale integration due to its small dimensions (length ~ 1000 µm and width ~ 150 µm). It constitutes the basic component of a N by N matrix controlled by a microelectronic addressing system built on the same substrate. Our microactuator consists of a cantilever beam structure made of SiO_2 on top of which are situated heating resistors for the bilayers and a short-circuit-pad both made from aluminum. The passivation layer from the CMOS process covers the whole structure for its protection during micromachining steps carried out during post-processing for its release from the silicon substrate.

Initially, only one micromachining technique (involving TMAH) was used, and long etching times (> 9 h) were required in order to release the microstructures. However, the passivation layer from the CMOS process could protect the underlying metal from the TMAH for a sufficient time (only ~ 1-2 h). Consequently, we had to develop a micromachining strategy with shorter etching times to allow the complete release of the microstructures without damaging them. Post-processing begins with deposition (by sputtering) of a platinum layer intended to protect the abutment from subsequent etching. Our micromachining strategy is mainly based on the use of a hybrid etching process starting with a first anisotropic TMAH etching followed by a XeF_2 isotropic etching. A last etching step using reactive ion etching (RIE) removes the passivation layer from the bilayers and the short-circuit-pad. The microactuator design and the micromachining steps were optimized in order to reduce etching times while increasing the efficiency and the reproducibility of the different processes. The optimized micromachining strategy made it possible to completely release microactuators while keeping them intact after post-processing.

After micromachining, the released microactuator has a significant initial deflection with its tip reaching a height up to a hundred times higher than its thickness. This natural deflection results from the relaxation of internal stresses inside the thin films which are part of the microactuator. These internal stresses are intrinsics to the host CMOS process. We have developed a model of the microactuator's initial deflection using mechanical properties of thin films and dimensions of the structure. Since the simulated deflection profile matched the profile obtained experimentally, we have studied with our model the influence of internal stresses in each thin film on the natural deflection of the structure.

Actuation experiments were performed in order to characterize the deflection of the microactuator with respect to the heating of the bilayers (separately and together). We have developed a thermal actuation analytical model for an n-layers multimorph structure, which takes into account the initial deflection resulting from the relaxation of stresses as well as the deflection due to the temperature increase during the electrothermal activation of the bilayers. We have applied this analytical model to our microactuator which includes three layers (SiO_2, Al and passivation) and is made of different sections (bilayers, short circuit-pad etc...). It has enabled us to match experimental measurements of its initial and thermal actuation deflection profile as a function of the electric inputs applied to the heating resistors of the bilayers. Using these results, we have been able to estimate the temperatures reached during our actuation tests. Results obtained by means of finite elements simulations (Ansys software) are in good agreement with those obtained using our analytical model. The validation of our analytical model, with experimental measurements and simulations by finite elements, enable us to predict the favorable operating conditions of the microactuator, as a bimorph or trimorph configuration, and with different thicknesses and stresses in the thin films.

Key words: MEMS, electrothermal microactuator, bistability, CMOS process, micromachining, anisotropic and isotropic etching, cantilever beam, multimorph, thermal actuation modeling.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE iv
REMERCIEMENTS v
RÉSUMÉ ix
ABSTRACT xii
TABLE DES MATIÈRES xv
LISTE DES ANNEXES xxi
LISTE DES TABLEAUX xxiii
LISTE DES FIGURES xxv
LISTE DES SIGLES ET DES SYMBOLES xxxvii

CHAPITRE 1: INTRODUCTION

1.1 Introduction 1

1.2 Les MEMS: des systèmes micro-électro-mécaniques 2

1.2.1 Définition générale des MEMS 2
1.2.2 Dispositifs MEMS: senseurs et actuateurs 3
1.2.3 Applications et projections de marché pour les MEMS 4

1.3 La technologie de microfabrication des MEMS 7

1.3.1 Les matériaux pour les MEMS 7
1.3.2 Les techniques de microfabrication et de micro-usinage 11

1.4 Domaines d'application du microactuateur bistable 16

1.4.1 Intégration à un micro-administrateur pharmaceutique 17
1.4.2 Micro-relais pour les télécommunications 21

1.5 Objectifs et organisation de la thèse 23

1.5.1 Objectifs du projet de recherche 23
1.5.2 Organisation de la thèse 25

1.6 Conclusions du chapitre 1 26

CHAPITRE 2: CONCEPTION ET DESIGN DU MICROACTUATEUR ELECTRO-THERMIQUE BISTABLE

2.1 Introduction 27

2.2 État de l'art sur les microactuateurs 28

2.2.1 Les micro-commutateurs monostables/bistables 28

2.2.2 Les microactuateurs fabriqués avec une technologie standard CMOS 30

2.2.3 Les microactuateurs électrothermiques 34

2.3 Principe d'opération et innovation du microactuateur conçu 38

2.3.1 Principe d'opération du microactuateur 38

2.3.1.1 Principe de l'effet bimorphe d'une structure bilame 38

2.3.1.2 Bistabilité du microactuateur: principe d'opération 40

2.3.2 Innovation du dispositif par rapport aux microactuateurs existants 42

2.4 Conception et design du microactuateur électrothermique bistable 43

2.4.1 Modélisation thermomécanique d'une structure bimorphe 43

2.4.2 Design des résistances de chauffage pour les bilames A et B 47

2.4.2.1 Considérations électrothermiques 47

2.4.2.2 Considérations thermomécaniques 51

2.4.3 Analyse des transferts de chaleur pour une structure bimorphe 56

2.4.3.1 La conduction thermique 57

2.4.3.2 La convection thermique 60

2.4.3.3 Le rayonnement thermique 62

2.4.4 Modélisation thermique du microactuateur bimorphe 64

2.4.4.1 Apport de chaleur par effet joule 64

2.4.4.2 Profils thermiques du microactuateur 67

2.4.4.3 Activation du microactuateur dans le vide 70

2.4.4.4 Conductances thermiques des bilames A et B 72

2.4.5 Design du pad court-circuiteur 74

2.5 Conclusions du chapitre 2 75

CHAPITRE 3: CONCEPTION DE LA MICROFABRICATION DU DISPOSITIF EN TECHNOLOGIE CMOS

3.1 Introduction 76

3.2 Conception du dispositif dans une technologie standard CMOS 77

3.2.1 Description du procédé Mitel 1,5 µm CMOS 77

3.2.2 Description du post-traitement Can-MEMS 78

3.2.3 Implémentation de différentes générations de designs 79

3.2.4 Conception, design et simulation de la fabrication du microactuateur 80

3.3 Stratégie et techniques de micro-usinage utilisées en post-traitement 84

3.3.1 Conception d'une stratégie de micro-usinage en post-traitement 84

3.3.2 Techniques de micro-usinage utilisées en post-traitement 85

3.4 Conclusions du chapitre 3 86

CHAPITRE 4: MICRO-USINAGE DE L'ACTUATEUR: MESURES, RESULTATS ET DISCUSSION

4.1 Introduction 87

4.2 Caractérisation des couches minces du procédé standard CMOS 88

4.2.1 Caractérisation des épaisseurs de couches minces CMOS 89

4.2.2 Caractérisation des épaisseurs de couches minces du microactuateur 91

4.2.3 Évaluation des modules d'Young des couches minces de l'actuateur 94

4.3 Étape 1: Dépôt de motifs de platine par pulvérisation et lift-off 95

4.3.1 Motifs de platine déposés sur les actuateurs 95

4.3.2 Optimisation de la procédure de dépôt et de lift-off du platine 95

4.4 Étape 2: Gravure anisotrope du silicium au TMAH 98

4.4.1 Gravure anisotrope du silicium 98

4.4.2 Couches minces du procédé standard CMOS exposées au TMAH 100

4.4.3 Optimisation du design de l'actuateur pour la gravure au TMAH 102

4.4.4 Optimisation du procédé de gravure du silicium au TMAH 111
4.4.5 Simulation de la gravure anisotrope du microactuateur au TMAH 112

4.5 Étape 3: Gravure isotrope du silicium au XeF_2 119

4.5.1 Gravure isotrope du silicium 119
4.5.2 Couches minces du procédé standard CMOS exposées au XeF_2 121
4.5.3 Optimisation de l'étape de gravure au XeF_2 124
4.5.4 Combinaison de gravures au TMAH et au XeF_2 125

4.6 Étape 4: Gravure de la couche de passivation au RIE 128

4.6.1 Gravure anisotrope de la couche de passivation au RIE 128
4.6.2 Optimisation du procédé de gravure au RIE 129

4.7 Conclusions du chapitre 4 130

CHAPITRE 5: CARACTÉRISATION, TESTS D'ACTUATION ET MODÉLISATION DU MICROACTUATEUR

5.1 Introduction 131

5.2 Déflexion initiale de la structure: caractérisation et modélisation 132

5.2.1 Observations au MEB de l'actuateur libéré du substrat de silicium 132
5.2.2 Caractérisation de la déflexion initiale du microactuateur 135
5.2.2.1 Profil de déflexion obtenu au moyen d'un microscope optique 135
5.2.2.2 Profil de déflexion obtenu avec un profilomètre optique 3D 137
5.2.3 Modélisation de la déflexion initiale d'une structure bimorphe 138
5.2.3.1 Rayon de courbure en fonction des contraintes internes σ_1 et σ_2 138
5.2.3.2 Déflexion initiale d'une structure en fonction de son rayon de courbure 140
5.2.3.3 Modélisation bimorphe de la déflexion initiale du microactuateur 142
5.2.4 Modélisation de la déflexion initiale d'une structure multimorphe 146
5.2.4.1 Rayon de courbure en fonction des contraintes internes σ_i (i = 1 à n) 146
5.2.4.2 Modélisation à n = 3 couches de la déflexion initiale du microactuateur 149
5.2.4.3 Simulation par éléments finis de la déflexion initiale du microactuateur 151
5.2.4.4 Influence de la variation des contraintes internes sur la déflexion initiale 152
5.2.5 Force de contact et contrainte maximale de la microstructure défléchie 153

5.3 Tests d'actuation et modélisation du microactuateur 156

5.3.1 Tests d'actuation du microactuateur électro-thermo-mécanique 156

5.3.1.1 Montage expérimental pour les tests d'actuation 156

5.3.1.2 Tests d'actuation sur chaque bilame du microactuateur 157

5.3.1.3 Tests d'actuation des bilames A et B activés simultanément 159

5.3.2 Modélisation de l'actuation thermique d'une structure bimorphe 160

5.3.2.1 Rayon de courbure en fonction de ΔT et des contraintes internes σ_1 et σ_2 160

5.3.2.2 Modélisation bimorphe de l'actuation thermique du microactuateur 160

5.3.3 Modélisation de l'actuation thermique d'une structure multimorphe 162

5.3.3.1 Rayon de courbure en fonction de ΔT et des contraintes internes σ_i 162

5.3.3.2 Modélisation à n = 3 couches de l'actuation thermique du microactuateur 163

5.3.3.3 Simulation par éléments finis de l'actuation thermique du microactuateur 166

5.3.3.4 Influence de la variation de l'épaisseur de la couche de passivation 168

5.3.3.5 Conductances thermiques des bilames A et B 169

5.3.3.6 Estimation des températures des tests d'actuation 170

5.3.4 Fréquence de résonance et temps caractéristique d'actuation 175

5.3.4.1 Calcul et mesures de la fréquence de résonance du microactuateur 175

5.3.4.2 Détermination du temps caractéristique d'actuation des bilames 177

5.3.5 Transition du microactuateur entre les états ON et OFF 178

5.3.5.1 Conditions de fonctionnement du microactuateur bimorphe 178

5.3.5.2 Démonstration de l'opération d'un microactuateur trimorphe 183

5.4 Conclusions du chapitre 5 186

CHAPITRE 6: CONCLUSION, CONTRIBUTIONS ET SUGGESTIONS POUR DE FUTURS TRAVAUX

6.1 Introduction 187

6.2 Synthèse et conclusions 188

6.2.1 Chap. 1: Introduction 188

6.2.2 Chap. 2: Conception du microactuateur électrothermique bistable 188

6.2.3 Chap. 3: Fabrication du dispositif en technologie CMOS 189

6.2.4 Chap. 4: Micro-usinage de l'actuateur: mesures, résultats et discussion 190

6.2.5 Chap. 5: Caractérisation et modélisation du microactuateur 192

6.3 Contributions scientifiques 195

6.4 Suggestions pour de futurs travaux 197

RÉFÉRENCES 200

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A: IMPLÉMENTATION DE DIFFÉRENTS DESIGNS AU PROCÉDÉ STANDARD CMOS 212

A.1 Procédure pour la fabrication de dispositifs via la CMC 212

A.2 Code d'identification des designs et des séries de fabrication 212

A.3 Différents designs implémentés au procédé CMOS 213

A.4 Post-traitements effectués sur les différents designs 225

ANNEXE B: CONCEPTION DU SYSTÈME D'ADRESSAGE MICROÉLECTRONIQUE DE LA MATRICE D'ACTUATEURS 226

ANNEXE C: PRINCIPES DES TECHNIQUES DE MICROFABRICATION UTILISÉES EN POST-TRAITEMENT 228

C.1 Dépôt et mise en forme d'une couche mince de Pt par pulvérisation et lift-off 228

C.2 Gravure anisotrope du silicium au TMAH 232

C.3 Gravure isotrope du silicium au XeF_2 234

C.4 Gravure plasma à ions réactifs 235

ANNEXE D: DÉVELOPPEMENT DES PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES (POST-TRAITEMENT) 237

D.1 Procédure expérimentale pour la définition des motifs de Pt 237

D.2 Procédure de dépôt et de mise en forme d'une résine négative 243

D.3 Procédure expérimentale pour la gravure au TMAH 243

D.4 Optimisation de l'étape de gravure au TMAH 245

D.5 Procédure expérimentale pour la gravure au XeF_2 248

D.6 Optimisation de l'étape de gravure au XeF_2 251

D.7 Procédure expérimentale pour la gravure RIE 252

ANNEXE E: MESURES PROFILOMÉTRIQUES SUR LES COUCHES MINCES DU PROCÉDÉ CMOS 253

E.1 Mesures profilométriques sur les couches minces CMOS 253

E.2 Mesures profilométriques sur les couches minces CMOS exposées au TMAH 258

ANNEXE F: ÉVALUATION DES MODULES D'YOUNG DE COUCHES MINCES CMOS PAR NANO-INDENTATION 260

F.1 Évaluation de modules d'Young avec nano-indenteur 1 260

F.2 Évaluation de modules d'Young avec nano-indenteur 2 263

ANNEXE G: TECHNIQUES SPÉCIALES POUR LA CARACTÉRISATION DU MICROACTUATEUR 266

G.1 Caractérisation de la déflexion initiale par profilométrie optique 3D 266

G.2 Caractérisation de la fréquence de résonance du microactuateur 268

ANNEXE F: PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS DES TRAVAUX DE RECHERCHE DE LA THÈSE 270

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Propriétés physiques du silicium, du quartz et de l'acier inoxydable..... 7
Tableau 1.2: Notations standards avec les indices de Miller..... 8
Tableau 2.1: Propriétés physiques des matériaux utilisés dans la fabrication de microactuateurs utilisant l'effet d'expansion thermique.....48
Tableau 2.2: Caractéristiques physiques des couches minces SiO_2 et Al pour les calculs de déflexion des bilames A et B. 51
Tableau 2.3: Conductance thermique théorique du bilame A calculée à partir du modèle thermique du microactuateur bimorphe. 73
Tableau 2.4: Conductance thermique théorique du bilame B calculée à partir du modèle thermique du microactuateur bimorphe. 73
Tableau 4.1: Composition des carrés de couches minces du design ICBPMAT5.....88
Tableau 4.2: Mesures profilométriques sur les carrés de couches minces du design ICBPMAT5 et comparaison des épaisseurs nominales et estimées de ces couches. 90
Tableau 4.3: Épaisseurs des couches minces du microactuateur estimées au FESEM.....93
Tableau 4.4: Taux de gravure et de sous-gravure du silicium mesurés pour les microactuateurs des designs ICBPMET6 et ICBPMET7. 126
Tableau 4.5: Taux de gravure et de sous-gravure du silicium mesurés pour les microactuateurs du design ICBPMAT5.....126
Tableau 4.6: Taux de gravure de la couche de passivation et du silicium mesurés après une gravure RIE au CF_4 de 30 min.....129
Tableau 4.7: Taux de gravure de la couche de passivation et du silicium mesurés après une gravure RIE au CF_4/O_2 de 10 min 129
Tableau 4.8: Stratégie de micro-usinage optimisée pour le post-traitement du design ICBPMAT5.....130
Tableau 5.1: Paramètres physiques utilisés pour le modèle bimorphe de la déflexion initiale. 142
Tableau 5.2: Caractéristiques des couches minces du microactuateur trimorphe.....149
Tableau 5.3: Conductivité thermique des matériaux utilisés pour le modèle d'actuation à n = 3 couches du microactuateur.. 164

Tableau 5.4: Conductance thermique théorique du bilame A calculée à partir de la modélisation thermique du microactuateur trimorphe. 169

Tableau 5.5: Conductance thermique théorique du bilame B calculée à partir de la modélisation thermique du microactuateur trimorphe. 169

Tableau 5.6: Plage de déflexions initiales pour des transitions du microactuateur bimorphe entre ses états ON et OFF. 179

Tableau 5.7: Propriétés physiques des couches SiO_2 et Al du microactuateur bimorphe défléchi initialement de 296,2 µm. 179

Tableau 5.8: Plage des déflexions initiales pour des transitions du microactuateur trimorphe entre ses états ON et OFF avec $\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1 = 500$ MPa 183

Tableau 5.9: Propriétés physiques des couches minces du microactuateur trimorphe défléchi initialement de 331,5 µm. 184

Tableau 5.10: Séquences de chauffage et de refroidissement des bilames A et B pour des transitions du microactuateur trimorphe entre ses états ON et OFF 184

Tableau A.1: Implémentation de différentes générations de design au procédé CMOS. 213

Tableau A.2: Différentes générations de designs et techniques de micro-usinage effectuées en post-traitement. 225

Tableau C.1: Réactifs et produits de la réaction du TMAH avec le Si 232

Tableau D.1: Paramètres utilisés pour l'étape de photolithographie 239

Tableau D.2: Paramètres utilisés pour le dépôt de Ti/Pt par pulvérisation magnétron 242

Tableau F.1: Comparaison de mesures par nano-indentation sur des couches minces CMOS. 265

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1:

Figure 1.1: Prévisions des revenus mondiaux pour les MEMS 2001-2006 selon une étude de marché de In-Stat/MDR 6

Figure 1.2: Total des marchés mondiaux pour la technologie des microsystèmes selon une étude de marché de NEXUS. 6

Figure 1.3: Vue en 3D de la structure cristallographique du silicium. 8

Figure 1.4: Illustration pour une gaufre de silicium {100} des méplats primaire et secondaire sur des gaufres dopées n et p ainsi que des différents plans dans le substrat. 9

Figure 1.5: Exemple d'une structure en porte-à-faux fabriquée selon un procédé additif avec un micro-usinage de surface 12

Figure 1.6: Exemple d'une structure en porte-à-faux fabriquée selon un procédé soustractif avec un micro-usinage en volume. 13

Figure 1.7: Profils de gravure isotrope obtenus dans un substrat de silicium avec (a) et sans agitation de la solution de gravure chimique (b). 13

Figure 1.8: Profils de gravure anisotrope obtenus suivant l'orientation cristalline {100} ou {110} du substrat de silicium. 14

Figure 1.9: Les étapes de fabrication du procédé LIGA. 15

Figure 1.10: Doses de médicaments administrées au moyen d'une seringue et du micro-administrateur pharmaceutique. 18

Figure 1.11: Micro-administrateur pharmaceutique avec des micro-cavités remplies de médicament solide à des nano-doses. 19

Figure 1.12: Modification des horaires de libération des médicaments du dispositif MAP à l'aide d'une télécommande personnalisée. 20

Figure 1.13: Matrice de micro-relais 3 par 3 permettant l'interconnexion entre des lignes d'entrée avec des lignes de sortie au moyen de micro-commutateurs. 22

Figure 1.14: Organigramme présentant l'organisation des chapitres de la thèse 25

Chapitre 2:

Figure 2.1: Micro-relais électrostatique: a) vue schématique et b) micrographie électronique à balayage du dispositif. 28

Figure 2.2: Micro-relais thermique avec une bille de mercure: a) vue schématique, b) micrographie optique du dispositif. 29

Figure 2.3: Micro-commutateur à verrouillage bistable: a) vue schématique et b) vue prise au MEB. 29

Figure 2.4: Micro-relais multimophe bistable: a) schéma des états "on" et "off" de l'actuateur b) vue prise au MEB. 30

Figure 2.5: Microstructures en polysilicium fabriquées en pré-traitement à un procédé CMOS avec un micro-usinage de surface. 32

Figure 2.6: Microstructures en polysilicium fabriquées en post-traitement à un procédé CMOS via un micro-usinage de surface. 32

Figure 2.7: Exemples de microstructures fabriquées avec un procédé CMOS suivi d'un micro-usinage en volume: a) plan des masques et b) vue en coupe transversale. 33

Figure 2.8: Senseurs thermoélectriques IR: a) schéma avec une vue de dessus, b) séquence de fabrication et c) micrographie MEB. 34

Figure 2.9: Actuateur électrothermique en forme de C: a) vue schématique, b) opération d'un micro-conteneur et c) micrographie MEB. 36

Figure 2.10: Design d'un actuateur électrothermique en polysilicium avec un déplacement latéral dans le plan du substrat. 37

Figure 2.11: Actuateur électrothermique bimorphe vertical: a) vue schématique, b) procédé de microfabrication et c) micrographie MEB d'une partie de l'actuateur. 38

Figure 2.12: Chauffage d'une structure bimorphe de base composée de deux matériaux possédant des coefficients d'expansion thermique très différents. 39

Figure 2.13: Transition du microactuateur entre les états ON et OFF grâce à une séquence de chauffage et de refroidissement spécifique des bilames. 40

Figure 2.14: Vue schématique d'une structure en porte-à-faux bimorphe composée de deux matériaux en couches minces identifiés par les indices 1 et 2. 44

Figure 2.15: Diagramme des forces et des moments internes agissant sur les sections transversales d'un segment pris sur la longueur de la structure bimorphe. 45

Figure 2.16: Plan de masques du microactuateur du design ICBPMAT5 obtenu à l'aide du logiciel AutoCAD14. 48

Figure 2.17: Résistance de chauffage composée d'une ligne en aluminium dessinée en serpentin 50

Figure 2.18: Déflexion thermomécanique du bilame A obtenue avec une simulation par éléments finis du comportement thermomécanique. 53

Figure 2.19: Raccourcissement de la structure bilame sous l'effet de l'augmentation de température. 53

Figure 2.20: Déflexion thermomécanique du bilame B obtenue avec une simulation par éléments finis (Ansys). 55

Figure 2.21: Différents modes de transfert de chaleur pour une structure bilame. 57

Figure 2.22: Transfert de chaleur par conduction thermique au travers d'une plaque de surface A. 58

Figure 2.23: Bilan des modes de transfert de chaleur pour le microactuateur. 64

Figure 2.24: Bilan des transferts de chaleur dans un élément de volume de la structure bimorphe suspendue au-dessus d'un substrat. 65

Figure 2.25: Schéma du microactuateur lors du chauffage du bilame A à une température uniforme T_A (vue en coupe non à l'échelle). 67

Figure 2.26: Schéma du microactuateur avec chauffage du bilame B à une température uniforme T_B (vue en coupe non à l'échelle). 69

Figure 2.27: Profils thermiques du microactuateur lors du chauffage des bilames selon le modèle analytique simple. 70

Figure 2.28: Simulation par éléments finis (Ansys) du profil thermique dans la partie 1 du microactuateur lors du chauffage du bilame A. 71

Figure 2.29: Connexion entre ligne d'entrée et une ligne de sortie au moyen du pad court-circuiteur. 74

Chapitre 3:

Figure 3.1: Couches minces du procédé Mitel 1,5 µm CMOS (dans l'ordre de dépôt mais non dessinées à l'échelle)..... 78

Figure 3.2: Coupe transversale du micro-actuateur après le dépôt des couches minces..... 80

Figure 3.3: Superposition des plans de masques du microactuateur dessinés dans Cadence..... 81

Figure 3.4: Plans de masques du design ICBPMAT5..... 82

Figure 3.5: Simulation de la fabrication du microactuateur à l'aide du logiciel MemsproTools: a) plan de masques du microactuateur, b) définition du procédé de fabrication et c) vue en 3D du microactuateur..... 83

Figure 3.6: Coupe transversale du micro-actuateur après le micro-usinage du substrat et le retrait de la couche de passivation..... 84

Chapitre 4:

Figure 4.1: Micrographie optique d'une partie du design ICBPMAT5 comportant trois structures MEMS et des carrés de couches minces du procédé..... 88

Figure 4.2: Vue en perspective des carrés de couches minces (MemsproTools) permettant d'identifier l'emplacement des couches minces et des ouvertures vers le substrat..... 89

Figure 4.3: Recouvrement d'un carré de couche minces par une couche de SOG (dessin non à l'échelle)..... 90

Figure 4.4: Micrographie optique et représentation schématique d'un microactuateur indiquant les directions respectives C1 et C2 des coupes transversale et longitudinale..... 91

Figure 4.5: Coupe transversale C1 au FIB: a) vue générale b) agrandissement sur les lignes d'Al c) agrandissement un bord de la structure d) mesures des épaisseurs de couches minces du microactuateur..... 92

Figure 4.6: Coupe transversale C2 au FIB: a) vue générale b) agrandissement au niveau du pad court-circuiteur c) agrandissement entre l'extrémité de la poutre et la butée d) couches minces de la butée..... 94

Figure 4.7: Recouvrement de la butée de la structure MEMS par une couche mince de platine déposée par pulvérisation. 95

Figure 4.8: Procédé de dépôt et de mise en forme de platine par pulvérisation et lift-off au moyen d'une technique de lithographie bicouche. 96

Figure 4.9: Dépôt et mise en forme d'une couche mince de platine a) motifs (résine HPR 504) b) motifs (LOR10A) c) pulvérisation de platine d) motifs de platine obtenus par lift-off. 97

Figure 4.10: Micrographies optiques d'une structure en porte-à-faux après une gravure au TMAH 25% wt. à 90°C de a) 30 min b) 60 min c) 90 min et d) 120 min. 99

Figure 4.11: Micrographie MEB (vue de côté) d'une cavité micro-usinée dans un substrat (100). 99

Figure 4.12: Carrés de couches Mitel 1,5 μm CMOS avant et après une gravure au TMAH 25% wt. à 85°C. 100

Figure 4.13: Design ICBPMET4 ayant subi une gravure au TMAH 25% wt. à 80°C pendant 2 h. 101

Figure 4.14: Schéma des plans rapidement gravés sous une structure en porte-à-faux alignée avec la direction <110> du méplat. 103

Figure 4.15: Définition des taux de gravure et de sous-gravure sous un masque de SiO_2 dans un substrat de Si après une gravure anisotrope. 104

Figure 4.16: Conception de la structure en porte-à-faux avec plusieurs coins convexes pour atteindre les plans ayant un taux de gravure élevé dans le TMAH. 105

Figure 4.17: Schéma des plans rapidement gravés sous une structure en porte-à-faux orientée avec un angle de déviation de $\alpha = 22°$ par rapport à la direction <110>. 106

Figure 4.18: Micrographies optiques de l'extrémité et de la partie attachée de microactuateurs après une gravure au TMAH de 85°C pendant 90 min. 108

Figure 4.19: Micrographies optiques de structures en porte-à-faux du design ICBPMAT5 après une gravure au TMAH 25% à 90°C de 60 min. 109

Figure 4.20: Micrographie optique d'une structure en porte-à-faux, sans couche de passivation, avec une orientation $\alpha = 0°$ avec le méplat de la gaufre, après une gravure au TMAH. 109

Figure 4.21: Structure en porte-à-faux du design IMBPMET9 comportant plusieurs trous afin d'accélérer la sous-gravure du silicium par le TMAH 110

Figure 4.22: Paramètres de simulation pour la gravure anisotrope du silicium au TMAH (AnisE). 112

Figure 4.23: Masque du microactuateur du design ICBPMAT5 utilisé pour la simulation de la gravure anisotrope avec le logiciel AnisE. 113

Figure 4.24: Simulation de la gravure anisotrope du silicium pour un microactuateur alignée avec la direction <110> à l'aide du logiciel AnisE. 114

Figure 4.25: Micrographie optique de structures MEMS avec différentes orientations ayant subi une gravure au TMAH 25% wt. à 90°C pendant 2 h. 115

Figure 4.26: Simulation de la gravure anisotrope du silicium pour un microactuateur avec un angle de déviation $\alpha = 22°$ par rapport à la direction <110>. 116

Figure 4.27: Micrographie optique de microactuateurs orientés avec un angle $\alpha = 22°$ par rapport à la direction <110> et ayant subi une gravure anisotrope de 2 h au TMAH 25% wt. à 90°C. 118

Figure 4.28: Micrographies optiques d'une structure MEMS du design ICBPMET7 après des gravures au XeF_2 de: a) 30 min, b) 46 min, c) 90 min et d) 104 min. 120

Figure 4.29: Micrographie MEB d'une structure MEMS du design ICBPMAT5 ayant subi une gravure au TMAH à 90°C de 90 min suivie d'une gravure au XeF_2 de 10 min. 121

Figure 4.30: Carrés de couches minces du design ICBPMET8 après une gravure au XeF_2 de 30 min. 122

Figure 4.31: Micrographie optique des carrés de couches minces du design ICBPMAT5 ayant subi une gravure au XeF_2 de 4 min. 123

Figure 4.32: Micrographie optique d'une partie du design ICBPMAT5 ayant subi une gravure au TMAH de 60 min suivi d'une gravure au XeF_2 de 10 min. 124

Figure 4.33: Micrographies optiques de l'extrémité et de la partie attachée de microactuateurs des designs ICBPMET6 et ICBPMET7 après une gravure au TMAH de 85°C pendant 90 min, suivie d'une gravure au XeF_2 respectivement de 40 et 45 min. 125

Figure 4.34: Micrographie électronique à balayage de l'extrémité d'une structure en porte-à-faux restée coincée sous la butée après une gravure hybride. 127

Figure 4.35: Micrographies MEB des lignes d'aluminium protégées initialement par a) la couche de passivation et b) après une gravure RIE au CF_4. 128

Chapitre 5:

Figure 5.1: Micrographies électroniques à balayage d'un microactuateur complètement libéré (α = 20°) après une gravure hybride. a) vue générale b) agrandissement avec l'extrémité de la structure coincée sous la butée. 133

Figure 5.2: Micrographies électroniques à balayage de microactuateurs (α = 22°) après une gravure au TMAH suivie d'une gravure au XeF_2 a) illustration des états ON et OFF et b) observation de la gravure isotrope du substrat sous les structures. 134

Figure 5.3: Micrographie optique d'une matrice de microactuateurs libérées du substrat. 136

Figure 5.4: Mesures expérimentales du profil de déflexion d'un microactuateur libéré. 137

Figure 5.5: Structure en porte-à-faux bimorphe a) vue générale en perspective b) coupe longitudinale avec distribution des contraintes résiduelles et c) moments et forces résultants. 139

Figure 5.6: Représentation schématique du profil de déflexion d'une structure en porte-à-faux de longueur L et de rayon de courbure r. 140

Figure 5.7: Micrographie optique de microactuateurs libérés du substrat dont la couche de passivation a été gravée au RIE. 143

Figure 5.8: Profils de déflexions théoriques de la structure SiO_2-Al avec σ_1 variant de -400 MPa à 100 MPa et σ_2 = 200 MPa simulés avec le modèle bimorphe de la déflexion initiale. 144

Figure 5.9: Déflexions maximales du microactuateur SiO_2-Al en fonction de: 1) la variation de σ_1 avec σ_2 = 200 MPa et 2) la variation de σ_2 (Al) avec σ_1 = -300 MPa simulées avec le modèle bimorphe de la déflexion initiale. 145

Figure 5.10: Vue schématique d'une portion de structure à n-couches avec les forces axiales P_i et les moments de courbure M_i. 146

Figure 5.11: Profil de déflexion du microactuateur SiO_2-Al-PAS avec σ_1 = -300 MPa, σ_2 = 200 MPa et σ_3 = -50 MPa simulé à l'aide du modèle à n = 3 couches de la déflexion initiale et profil de déflexion obtenu avec les mesures expérimentales. 150

Figure 5.12: Profil de la déflexion initiale du microactuateur SiO_2-Al-PAS selon une simulation par éléments finis (Ansys). 151

Figure 5.13: Déflexions maximales du microactuateur SiO_2-Al-PAS en fonction de la contrainte dans chacune des couches minces, simulées avec le modèle à n = 3 couches de la déflexion initiale et le logiciel Ansys. 153

Figure 5.14: Simulations par éléments finis pour une poutre en SiO_2 soumise à une force de 120,2 μN à son extrémité du: a) profil de déflexion avec z_{max} = 458 μm et b) du gradient de la contrainte σ_x vers la partie attachée de la poutre avec σ_{max} = -221,6 MPa. 155

Figure 5.15: Force générée en fonction de la déflexion maximale initiale de la structure. 155

Figure 5.16: Station sous pointes reliée à un analyseur de paramètres semi-conducteurs utilisée pour les tests d'actuation. 156

Figure 5.17: Mesures expérimentales de la déflexion d du microactuateur en fonction de la puissance incidente P_A utilisée pour le chauffage du bilame A. 158

Figure 5.18: Mesures expérimentales de la déflexion d du microactuateur en fonction de la puissance incidente P_B utilisée pour le chauffage du bilame B. 158

Figure 5.19: Mesures expérimentales de la déflexion d du microactuateur en fonction de la puissance incidente totale P_T utilisée pour le chauffage simultané des bilames A et B. 159

Figure 5.20: Déflexions maximales du microactuateur en fonction du chauffage du bilame A ou B simulées à l'aide du modèle bimorphe de l'actuation thermique. 161

Figure 5.21: Déflexions maximales du microactuateur en fonction du chauffage du bilame A ou B simulées avec le modèle à n = 3 couches de l'actuation thermique. 165

Figure 5.22: Déflexion maximale du microactuateur en fonction du chauffage du bilame A jusqu'à T_A = 140°C, puis du bilame B en maintenant ΔT_A = 120°C, selon le modèle d'actuation trimorphe. 166

Figure 5.23: Déflexions maximales du microactuateur en fonction du chauffage du bilames A ou B selon des simulations par éléments finis (Ansys). 167

Figure 5.24: Profil de déflexion du microactuateur SiO_2-Al-PAS avec une augmentation de température dans le bilame A de ΔT_A = 120°C selon une simulation par éléments finis (Ansys). 167

Figure 5.25: Déflexions verticales du microactuateur en fonction du chauffage des bilames A ou B et de l'épaisseur de la couche de passivation simulées avec le modèle à n = 3 couches de l'actuation thermique. 168

Figure 5.26: Pont diviseur composé des résistances R_{Ac} et R_{Ai} telles que $R_A = R_{Ac}+R_{Ai}$. 171

Figure 5.27: Déflexions verticales du microactuateur en fonction de la puissance appliquée P_A selon les mesures expérimentales $d = f(P_A)$ et des simulations basées sur le modèle à n = 3 couches de l'actuation thermique $d_{th} = f(P_A)$ et $G_{thA} = 94{,}6\ \mu W/K$. 172

Figure 5.28: Déflexions verticales du microactuateur en fonction de la puissance appliquée P_B selon les mesures expérimentales $d = f(P_B)$ et des simulations basées sur le modèle à n = 3 couches de l'actuation thermique $d_{th} = f(P_B)$ et $G_{thB} = 96{,}9\ \mu W/K$. 172

Figure 5.29: Résistances des bilames en fonction des puissances appliquées selon: 1) les mesures expérimentales $R_A = f(P_A)$ et $R_B = f(P_B)$ et 2) les valeurs théoriques $R_{Ath} = f(P_A)$ et $R_{Bth} = f(P_B)$ calculées à partir des équations 5.42 et 5.43. 173

Figure 5.30: Déflexions verticales (en valeur absolue) du microactuateur et températures atteintes par le bilame A en fonction des puissances appliquées, obtenues avec des simulations basées sur le modèle à n = 3 couches de l'actuation thermique et $G_{thA} = 94{,}6\ \mu W/K$. 174

Figure 5.31: Déflexions verticales (en valeur absolue) du microactuateur et températures atteintes par le bilame B en fonction des puissances appliquées, obtenues avec des simulations basées sur le modèle à n = 3 couches de l'actuation thermique et $G_{thB} = 96{,}9\ \mu W/K$. 175

Figure 5.32: Fréquence de résonance selon la longueur du microactuateur 176

Figure 5.33: Profils de déflexion du microactuateur SiO_2-Al au cours de la transition de l'état ON à l'état OFF, obtenus avec des simulations basées sur le modèle bimorphe de l'actuation thermique (section 5.3.2.2). 181

Figure 5.34: Agrandissement au niveau de la butée des profils de déflexion du microactuateur SiO_2-Al selon le modèle bimorphe d'actuation thermique. 181

Figure 5.35: Profils de déflexion du microactuateur SiO_2-Al-PAS au cours de la transition de l'état ON à l'état OFF, obtenus avec des simulations basées sur le modèle à n = 3 couches de l'actuation thermique (section 5.3.3.2). 185

Figure 5.36: Agrandissement au niveau de la butée des profils de déflexion du microactuateur SiO_2-Al-PAS selon le modèle à n = 3 couches de l'actuation thermique.....185

Annexes:

Figure A.1: Design ICBPMET3 - série de fabrication 9701CB..... 214
Figure A.2: Design IMBPMET4 - série de fabrication 9702MB..... 215
Figure A.3: Design ICBPMET5 - série de fabrication 9702CB..... 216
Figure A.4: Design IMBPMET6 - série de fabrication 9703MB..... 217
Figure A.5: Designs IMBPMET7 - série de fabrication 9703MB..... 218
Figure A.6: Design ICBPMET8 - série de fabrication 9703CB..... 219
Figure A.7: Design ICBPMET9 - série de fabrication 9801MB..... 220
Figure A.8: Design ICBPMAT2 - série de fabrication 9802CB..... 221
Figure A.9: Design ICBPMAT3 - série de fabrication 9901CB..... 221
Figure A.10: Design ICBPMAT4 - série de fabrication 9901CB..... 223
Figure A.11: Design ICBPMAT5 - série de fabrication 0003CB..... 224
Figure B.1: Schéma de la matrice 3 par 3 de micro-relais avec le système d'adressage..... 226
Figure C.1: Illustration d'un procédé de pulvérisation DC avec un plasma d'argon..... 229
Figure C.2: Étapes de définition d'un motif métallique déposé par pulvérisation et mise en forme par lift-off..... 231
Figure C.3: Plans cristallins du silicium (100), (110) et (111)..... 232
Figure C.4: Cavités micro-usinées dans le silicium suivant la forme de l'ouverture dans le masque et son alignement par rapport à la direction du méplat..... 233
Figure C.5: Processus de gravure RIE d'un substrat de Si à l'aide d'un plasma de CF_4..... 235
Figure D.1: Aligneur de masque utilisant une lampe UV à mercure de 350 W (longueur d'onde λ = 365 nm et une puissance d'insolation au niveau du substrat de 6 mW/cm^2)..... 238
Figure D.2: Montage expérimental du pulvérisateur magnétron UHV..... 239
Figure D.3: Vue schématique du pulvérisateur magnétron..... 240

Figure D.4: Observation du plasma d'argon confiné au niveau des cibles de Ti (a) et de Pt (b) durant le dépôt d'une couche de Ti/Pt sur la surface d'une quart de gaufre. 241

Figure D.5: Décollement de la couche mince de platine dans les régions non désirées suivant la technique du lift-off: a) après le dépôt du Pt et b) au cours du lift-off. 242

Figure D.6: Schéma du montage de gravure au TMAH. 244

Figure D.7: Montage expérimental pour la gravure anisotrope au TMAH. 244

Figure D.8: Micrographie optique du design ICBPMET3 après une gravure au TMAH 25% wt. à 90°C de 2 h a) vue générale du dé gravé aux coins convexes b) agrandissement d'un coin convexe brisé. 246

Figure D.9: Dé du design ICBPMAT5 d'une taille de 9 x 9 mm^2. 247

Figure D.10: Introduction des cristaux de XeF_2 dans la chambre source sous atmosphère d'argon. 248

Figure D.11: Différents types d'échantillons dans la chambre de gravure au XeF_2. 248

Figure D.12: Schéma du montage de gravure au XeF_2. 249

Figure D.13: Montage expérimental pour la gravure isotrope au XeF_2. 250

Figure D.14: Montage expérimental du RIE 252

Figure E.1: Mesures au profilomètre Dektak sur les carrées de couches minces diélectriques du design ICBPMAT5: a) couches d'oxydes séparément et b) combinaison de ces couches diélectriques. 255

Figure E.2: Mesures au profilomètre Dektak sur les carrées de couches minces conductrices du design ICBPMAT5: a) couche de polysilicium et deux couches de métal et b) combinaison de ces couches conductrices. 257

Figure F.1: Mesures de modules d'Young sur: a) le substrat de silicium et b) le carré de couches minces ACT-CON du design ICBPMAT5 261

Figure F.2: Mesures de modules d'Young sur: a) la seconde couche métallique sur le carré ACT-CON-M2 et b) la couche de passivation sur le carré ACT-CON-PAS du design ICBPMAT5. 262

Figure F.3: Mesures par nano-indentation des modules d'Young sur les carrés de couches minces du design ICBPMAT5: a) couches diélectriques ACT, CON et VIA et substrat de Si b) couche de métal M2, couche de passivation PAS, substrat de Si et étalon de SiO_2. 264

Figure G.1: Images 3D obtenues par profilométrie optique sur différentes parties du microactuateur du design ICBPMAT5 libéré et profil général de déflexion de la poutre obtenu à l'aide du MEB confocal. 267

Figure G.2: Micrographie OCT montrant les deux structures en porte-à-faux du design ICBPMAT5 qui ont été caractérisées. 268

Figure G.3: Plages de temps et de fréquence pour l'actuateur 1 269

Figure G.4: Plages de temps et de fréquence pour l'actuateur 2 269

LISTE DES SIGLES ET DES SYMBOLES

Sigles:

CAD	conception assistée par ordinateur
CMOS	complementary metal oxide semiconductor
CMP	chemical mechanical polishing
CVD	chemical vapor deposition
DC	direct courant
DI	dé-ionisée
DIP	dual-in-line
DSL	digital subscriber line
DRIE	deep reactive ion etching
ECR	electron cyclotron resonance
EDP	éthylène diamine pyrocatéchol
ER	etch rate
FIB	focused ion beam
KOH	hydroxyde de potassium
HF	acide fluorhydrique
IC	integrated circuit
IR	infra-rouge
LIGA	lithographie, électrodéposition (galvanoformung), moulage (abformung)
LPCVD	low-pressure chemical vapor deposition
LCVD	laser chemical vapor deposition
MAP	micro-administrateur pharmaceutique
MBE	molecular beam epitaxy
MEB	microscope électronique à balayage
MEMS	micro-electro-mechanical-system
MOEMS	micro-opto-electro-mechanical-system
MOSFET	metal oxide semiconductor field-effect transistor

MUMPS	multi-user MEMS process
MST	microsystems technology
PCB	printed circuit board
PMMA	polyméthylmétacrylate
PECVD	plasma-enhanced chemical vapor deposition
PGA	pin grid array
PLD	physical laser deposition
PVD	physical vapor deposition
PSG	phosphosilicate glass
RF	radio-fréquence
RIE	reactive ion etching
SCREAM	single crystal reactive ion etching and metallization
SOG	spin-on-glass
SOI	silicon-on-insulator
TMAH	tetramethylammonium hydroxyde
TTL	transistor transistor logic
UV	ultra-violet
UER	under-etch-rate
UHV	ultra high vacuum
VLSI	very large scale integration
XeF_2	xenon difluoride

Symboles:

A	aire
a	paramètre de maille
b	largeur de couche mince
C_p	chaleur spécifique
d	déflexion
e	épaisseur
f_1	fréquence de résonance

E	module d'Young
F_{eq}	force générée
g	accélération de la pesanteur
Gr	nombre de Grashof
G_{th}	conductance thermique
h	coefficient d'échange de chaleur
h_{conv}	coefficient de convection naturelle
h_{rad}	coefficient d'échange de chaleur par radiation
I	courant électrique; moment d'inertie
k	courbure; conductivité thermique
L	longueur
M	moment
n	nombre de couches minces
P	force axiale
P_e	puissance électrique
Pr	nombre de Prandtl
P_{th}	puissance thermique
Q	chaleur
$R_{\square}$	résistance par carré
R	résistance électrique
r	rayon de courbure
Ra	nombre de Rayleigh
R_{th}	résistance thermique
S	section transversale ou surface
T	température
T_{amb}	température du milieu ambiant
t	épaisseur de couche mince; temps
V	tension électrique
W	largeur

α	coefficient d'expansion thermique; angle de déviation
β	coefficient de dilatation volumique d'un fluide ou de variation de la résistance
θ	angle d'inclinaison
ε	émissivité d'une surface
Φ	flux de chaleur
Φ'	densité de flux de chaleur
Φ''	puissance thermique
γ	facteur de conversion entre déflexion et puissance
λ	longueur d'onde
μ	viscosité dynamique d'un fluide
υ	viscosité cinématique d'un fluide; coefficient de poisson
ρ	densité
ρ_{th}	résistivité thermique
σ	conductivité électrique; constante de Stefan-Boltzmann; contrainte interne
τ	temps caractéristique

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Introduction

L'invention du transistor en 1947 et le développement des circuits intégrés (IC) à partir de 1958 ont permis de remplacer les tubes à vide utilisés dans les produits électroniques depuis 1906 par des transistors dont la taille est mesurée en micromètres (μm) [1]. Les progrès techniques réalisés dans l'industrie des semi-conducteurs afin d'augmenter la densité et les performances des composants permettent de nos jours l'intégration de millions de transistors sur une puce. Si la technologie silicium permet de réduire les tailles de transistor selon la loi de Moore [2], les MEMS (systèmes micro-électro-mécaniques) permettent la miniaturisation de systèmes électromécaniques. Fondés à partir des techniques de base de la microélectronique, les MEMS promettent de révolutionner de nombreuses industries en ce début de millénaire en permettant la création de composants plus petits et plus performants tout en réduisant les coûts de fabrication. Dans cet objectif, cette thèse de doctorat avait pour but spécifique d'étudier l'implémentation d'un microactuateur électrothermique bistable dans une technologie standard CMOS avec un post-traitement compatible CMOS.

Ce chapitre débute par une introduction générale sur les systèmes micro-électro-mécaniques (MEMS) et leurs applications. Le terme MEMS décrit non seulement les dispositifs miniaturisés mais également un ensemble d'outils de conception et de microfabrication pour la mise en œuvre de telles microstructures. Les applications potentielles du microactuateur conçu sont ensuite présentées. Tandis que les principaux objectifs de ce projet de recherche et l'organisation des chapitres de cette thèse sont décrits à la fin de ce chapitre.

1.2 Les MEMS: des systèmes micro-électro-mécaniques

1.2.1 Définition générale des MEMS

Les systèmes micro-électro-mécaniques sont connus en Amérique du nord sous l'acronyme MEMS (microelectromechanical system). En Europe, la même technologie est plutôt appelée technologie des microsystèmes sous l'acronyme MST (microsystems technology).

Richard P. Feynman a donné une présentation intitulée: "There's Plenty of Room at the Bottom" le 26 décembre 1959 lors la rencontre annuelle de la société américaine de physique (APS) à l'Institut de Technologie de Californie (Caltech) [3]. Il décrivait un domaine où peu de recherche avait été faite à cette époque mais qui pourrait avoir un très grand nombre d'applications techniques. Il parlait de manipuler et de contrôler des objets à très petite échelle. L'émergence du domaine des MEMS a eu lieu au début des années 1980. Dans l'historique de la technologie, Kurt Petersen a publié en 1982 un article sous le titre: "Silicon as a Mechanical Material" dans les Proceedings IEEE [4]. Ainsi l'intérêt porté au silicium visait d'autres applications que les circuits intégrés. Selon Albert P. Pisano, l'acronyme MEMS a été officiellement adoptée à Salt Lake City en 1989 lors du Micro-Tele-Operated Robotics Workshop [5].

Les MEMS sont des micro-dispositifs intégrés d'une taille allant d'environ quelques micromètres à quelques millimètres. Ces dispositifs permettent notamment de mesurer des grandeurs physiques ou chimiques dans leur environnement, de traiter les informations recueillies, de les communiquer avec l'extérieur et de déclencher des actions. La technologie des MEMS utilise des techniques de base appartenant à la microélectronique alliée à des techniques de micro-usinage (micromachining ou microfabrication) développées spécifiquement pour ces microsystèmes. Par conséquent, les MEMS offrent l'avantage d'une grande réduction en taille et la possibilité d'être produit en masse à faible coût. Associés à des circuits microélectroniques, les MEMS visent à développer des fonctions telles que la perception de l'environnement, la transmission des données, la prise de décision et le déclenchement d'actions.

1.2.2 Dispositifs MEMS: senseurs et actuateurs

Les structures MEMS également nommés micro-transducteurs traduisant le fait qu'ils servent à la conversion d'un paramètre physique en un autre. Ces transducteurs se divisent principalement en deux catégories: les senseurs (capteurs) et les actuateurs (actionneurs).

Un senseur mesure un paramètre dans un environnement et fournit généralement un signal électrique de sortie lié au paramètre mesuré. Il permet de recueillir des mesures de paramètres physiques et de les traiter en communiquant avec une interface électronique. Le rôle d'un senseur est celui d'un transducteur d'entrée en recueillant l'information. Les signaux générés par les senseurs sont faibles et doivent être amplifiés par un traitement du signal afin de pouvoir déclencher une action. Les senseurs assurent donc les fonctions de capteurs pouvant mesurer des paramètres physiques principalement dans six domaines: 1) la thermique incluant la température, la chaleur et le flux de chaleur; 2) la mécanique avec des mesures de position, de vitesse, d'accélération, de force et de pression; 3) la chimie dans le but de déterminer la concentration ou la composition de composés chimiques et la vitesse de réaction; 4) le magnétisme en mesurant l'intensité ou la densité de flux magnétique; 5) la radiation avec l'intensité de l'onde électromagnétique, la longueur d'onde, la polarisation et la phase; et 6) l'électricité avec des mesures de tension, de courant et de charge [6].

Les actuateurs se caractérisent par leur possibilité de bouger eux-mêmes ou de déplacer des objets. Ils jouent donc le rôle de transducteurs de sortie en permettant d'agir sur leur environnement. Contrairement aux senseurs, ces convertisseurs électromécaniques utilisent une source d'alimentation électrique afin de commander le mouvement de systèmes mécaniques. Du fait que les actuateurs sont de petites tailles, ils peuvent réaliser des actions très précises (pour déplacer, aligner, etc...). Un actuateur peut être fabriqué séparément du dispositif final (externe) ou faire partie du dispositif fabriqué (intégré). Pour des applications commerciales, des actuateurs externes fabriqués individuellement nécessitent un assemblage avec les éléments micro-usinés ce qui est très coûteux comparativement aux actuateurs intégrés [7]. Quelques exemples de microactuateurs sont: les micro-miroirs, les micro-commutateurs, les micro-pompes, les micro-valves pour la micro-analyse ou pour des systèmes micro-fluidiques, les micro-électrodes, les micro-pinces, les micro-moteurs etc. Les microactuateurs peuvent être

classés selon les différents types d'actuation utilisés pour leur fonctionnement: thermique, électrostatique, électromagnétique [8], piézoélectrique, pneumatique, à mémoire de forme. Certains actuateurs peuvent également être activés par une combinaison de plusieurs types d'actuation.

Les dispositifs intégrant des senseurs, des actuateurs et des composants électroniques peuvent également être définis comme des micro-systèmes [9]. Ces composants peuvent à la fois recueillir, interpréter des données, prendre des décisions et imposer une action sur leur environnement. Cependant le terme micro-système peut également s'appliquer à un senseur ou à un actuateur relié à un circuit électronique pour le rendre "intelligent" (smart sensors).

1.2.3 Applications et projections de marché pour les MEMS

Les MEMS sont caractérisés par leur grande diversité exprimée par l'étendue vaste des marchés et des domaines d'applications. Ils sont déjà présents ou en développement dans plusieurs domaines d'application tels que:

- l'automobile avec l'accéléromètre qui permet lors d'une décélération brusque, de déclencher instantanément le déploiement des systèmes à coussins d'air (airbags) afin de protéger les passagers, les senseurs de pression des pneus et ceux pour le contrôle de la suspension, les détecteurs pour le niveau de carburant et de la pression vapeur;
- l'informatique et ses périphériques avec les têtes de lecture/écriture de disques durs et les têtes d'imprimante à jet d'encre;
- l'aérospatial et l'aéronautique avec les capteurs de pression, les gyroscopes etc; par exemple, la mission américaine Space Shuttle utilise des MEMS pour le contrôle de la navigation, la détection, la propulsion et le contrôle thermique;
- la défense avec le guidage des armes, la surveillance aérienne et le stockage des données;
- le biomédical et la santé avec les bio-senseurs pour les diagnostiques médicaux et la surveillance tels que les senseurs de pression sanguine, les instruments de micro-analyse et de micro-chirurgie et les micro-pompes d'injection pour l'administration de médicaments, les stimulateurs cardiaques, les prothèses auditives;

- la communication avec des composants MOEMS (systèmes micro-opto-électro-mécaniques) tels que les micro-miroirs pour la commutation des signaux dans les fibres optiques et autres commutateurs photoniques, les interconnexions pour les réseaux à large bande passante, les relais micro-électro-mécaniques ainsi que les filtres et les commutateurs RF.

Plusieurs autres secteurs bénéficient de la technologie des MEMS parmi lesquels: l'environnement, la micro-fluidique, les micro-analyses chimiques, l'énergie, la domotique, l'instrumentation, la biotechnologie, la technologie de stockage des données etc. Des exemples de futures applications seraient: l'affichage à haute résolution et le stockage de données à haute densité.

Les marchés industriels sont intéressés à produire de nouveaux composants intelligents qui permettent de créer une nouvelle fonction ou d'améliorer les performances des dispositifs actuels tout en réduisant significativement les coûts de fabrication. Une technologie de miniaturisation des composants et des systèmes apparaît être la solution pour un grand nombre de projets d'innovation. Les composants MEMS étant petits et très légers, peuvent être intégrés en grand nombre sur une puce et augmenter la précision de la mesure pour un réseau de senseurs par exemple. Ces systèmes miniaturisés sont donc facilement transportables et nécessitent une énergie d'alimentation plus faible que leurs versions de plus grande taille. L'explosion de projets de recherche et de développement (R&D) en MEMS ainsi que la création de plusieurs nouvelles compagnies dans ce domaine technologique viennent répondre aux besoins de ces nouveaux marchés. Du fait que tous les grands marchés ont adopté cette technologie, les projections du marché pour les MEMS ont tendance à être très optimistes. Selon le groupe américain Cahners In-Stat /MDR (société d'étude de marché indépendante), les revenus mondiaux pour les MEMS devraient croîtrent de 3,9 milliards de $ en 2001 à 9,6 milliards de $ en 2006 tel qu'illustré sur la figure 1.1 [10].

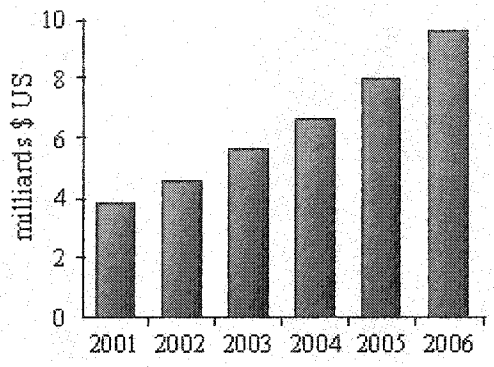


Figure 1.1: Prévisions des revenus mondiaux pour les MEMS 2001-2006 selon une étude de marché de In-Stat/MDR

Une étude de marché pour les MEMS réalisés par le réseau européen NEXUS (réseau d'excellence des microsystèmes multifonctionnels) estime à 68 milliards de $ pour 2005 tel qu'illustré sur la figure 1.2 [11].

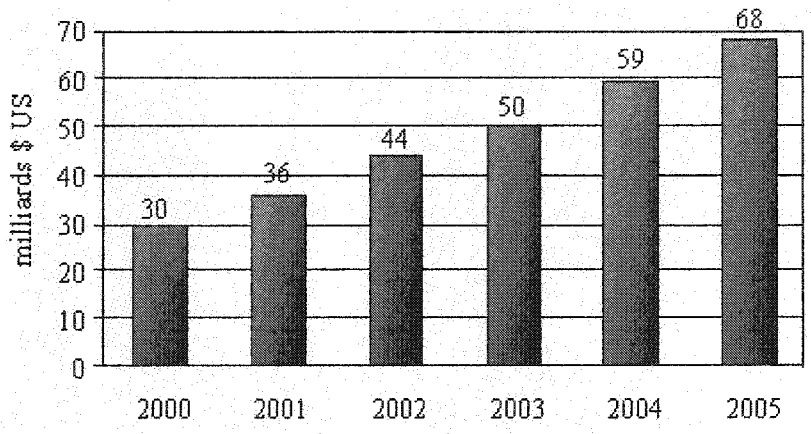


Figure 1.2: Total des marchés mondiaux pour la technologie des microsystèmes selon une étude de marché de NEXUS.

Les projections de marché de NEXUS ne prennent pas seulement en compte le marché des composants MEMS mais aussi les systèmes complets qui ont une valeur ajoutée élevée et une plus grande part de marché que les composants discrets. Il n'est donc pas possible de comparer cette estimation de marché avec celle de In-Stat/MDR.

1.3 La technologie de microfabrication des MEMS

Les systèmes micro-électro-mécaniques, plus petits et plus légers que leurs versions macroscopiques, nécessitent le développement d'outils de fabrication permettant de définir des géométries avec un contrôle très précis des dimensions. Le micro-usinage (micromachining) ou la microfabrication est l'ensemble des outils de design et de fabrication permettant de construire de telles microstructures.

1.3.1 Les matériaux pour les MEMS

La technologie des MEMS utilise à la base plusieurs outils de conception et de fabrication empruntés à la microélectronique. De ce fait, le silicium qui est le substrat de premier choix pour l'industrie microélectronique est également le matériau le plus utilisé dans le domaine des MEMS. La technologie des microsystèmes peut donc bénéficier de la technologie mature utilisée dans la fabrication de circuits intégrés. Dans le tableau 1.1, quelques propriétés physiques du silicium sont comparées à celles d'autres matériaux tels que le quartz et l'acier inoxydable. Il apparaît que le silicium est mécaniquement plus dur que l'acier alors que sa faible densité se compare à celle du quartz.

Tableau 1.1: Propriétés physiques du silicium, du quartz et de l'acier inoxydable [6,12].

matériau	densité [g/cm^3]	module d'Young [GPa]	limite d'écoulement [GPa]	dureté [GPa]
quartz	2,20	87	0,5-0,7	8,2
silicium cristallin	2,32	(100) 129,5 (110) 168,0 (111) 185,5	2,8-6,8	8,5-11
acier inoxydable	7,9-8,2	206-235	0,5-1,5	6,6

Le silicium peut être déposé sous trois formes: monocristalline, polycristalline (polysilicium) et amorphe. Les substrats de silicium utilisés dans la fabrication de circuits VLSI (very large scale integration) sont monocristallins. Par conséquent, dans la suite de cette thèse, l'utilisation du mot silicium fera toujours référence au silicium monocristallin. Il a la structure cristalline du diamant qui peut être décrite par deux structures cubiques faces centrées (c.f.c.)

s'interpénétrant. La figure 1.3 représente une vue schématique en trois dimensions de sa structure cristalline caractérisée par un paramètre de maille a = 5,43 Å. Un atome de silicium possède quatre électrons périphériques. Par conséquent il a tendance à se lier à quatre atomes voisins pour former un tétraèdre régulier.

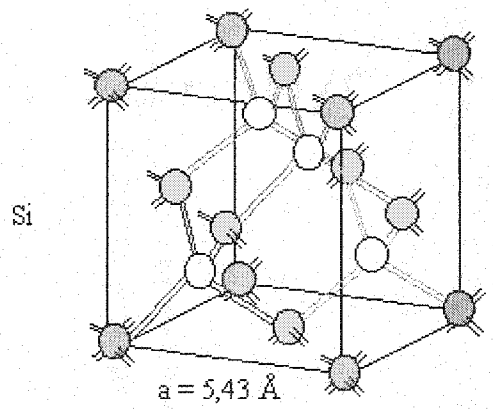


Figure 1.3: Vue en 3D de la structure cristallographique du silicium.

Rappelons que les différents plans cristallins du silicium peuvent être identifiés par trois entiers h, k, et l, appelés les indices de Miller [13] dont les notations standards sont présentées dans le tableau 1.2.

Tableau 1.2: Notations standards avec les indices de Miller.

Notations standards pour les indices de Miller	
(hkl)	plan cristallin spécifique
{hkl}	famille de plans équivalents
[hkl]	direction spécifique d'un vecteur unitaire perpendiculaire au plan (hkl)
<ijk>	famille de directions équivalentes

Du fait que le silicium possède différents plans cristallins, il est possible de réaliser des gravures anisotrope qui utilisent les différents taux de gravure de ces plans cristallins pour micro-usiner des cavités par exemple (voir annexe D). Les substrats de silicium {100} avec un dopage de type n ou p sont prédominants dans les technologie CMOS (complementary-metal-oxide-semiconductor). Les gaufres de silicium sont identifiées par des méplats primaire et secondaire tel qu'illustré sur la figure 1.4, afin d'indiquer l'orientation de certains plans cristallins [5].

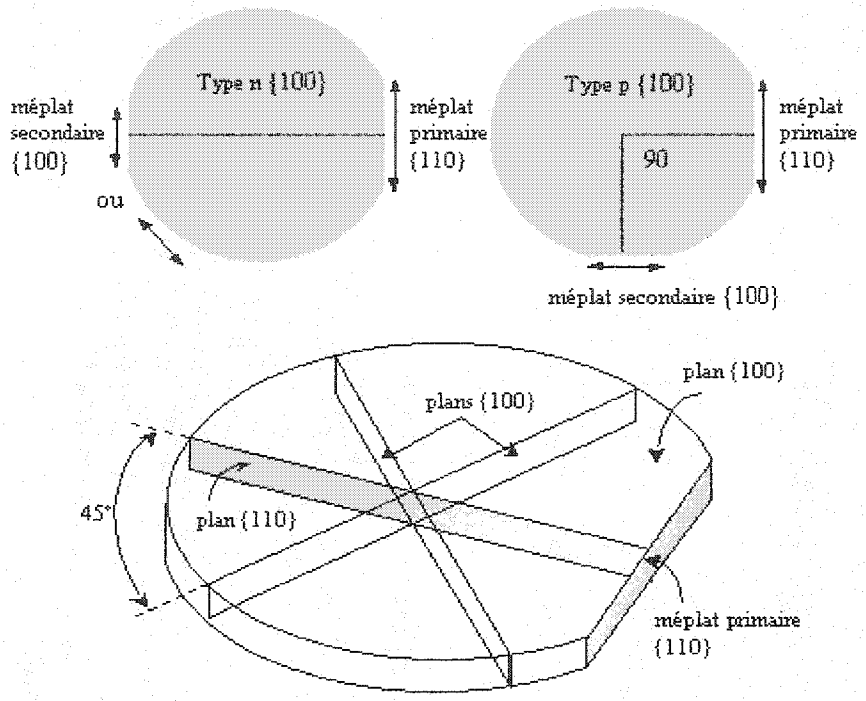


Figure 1.4: Illustration pour une gaufre de silicium {100} des méplats primaire et secondaire sur des gaufres dopées n et p ainsi que des différents plans dans le substrat.

Le tableau 1.1 montrait que le module d'Young dépend de l'orientation cristalline avec une valeur moyenne de 160 GPa. La dépendance des propriétés mécaniques suivant l'orientation cristalline se révèle notamment lors du clivage des gaufres de silicium le long de plans cristallins. Les substrats de silicium de 100 mm (4 po) de diamètre avec une épaisseur de 525 µm sont les plus utilisés par la communauté de micro-usinage. Tandis que l'industrie des circuits intégrés utilise actuellement de plaques pouvant aller jusqu'à 200 mm (8 po) et 300 mm (12 po).

Les matériaux les plus couramment employés dans la fabrication des circuits intégrés et des MEMS sur substrats de silicium sont: le silicium polycristallin (polysilicium ou poly), le dioxyde de silicium (oxyde) et le nitrure de silicium. Le polysilicium qui est généralement obtenu par dépôt chimique en phase vapeur (CVD, chemical vapor deposition) est particulièrement utilisé pour le micro-usinage de surface qui sera décrit plus loin dans ce chapitre. L'oxyde de silicium sous ses différentes formes (SiO_2, SiO_x et verre de silicate) est très utilisé dans la fabrication de microsystèmes du fait qu'il est un isolant électrique et thermique, qu'il peut servir de masque pour la gravure du substrat de silicium et qu'il soit gravé par l'acide

fluorhydrique (HF) avec une grande sélectivité vis à vis du silicium. L'oxydation thermique du silicium à une température supérieure à 800°C, dans une atmosphère sèche ou humide, permet d'obtenir une couche de dioxyde de silicium (SiO_2). Lors de la croissance de l'oxyde sur le Si, O_2 diffuse à travers l'oxyde existant et la croissance a lieu à l'interface Si/SiO_2. Les procédures de dépôt des autres formes d'oxydes et de verre sont le dépôt en phase vapeur chimique (CVD), la pulvérisation et le "spin-on". Le nitrure de silicium (Si_xN_y) est également très utilisé comme couche mince isolante et constitue une excellente barrière contre la diffusion d'ions tels que le sodium et le potassium. Sa grande résistance face à l'oxydation et vis à vis de plusieurs agents de gravure permet au nitrure de silicium de servir de masque pour des gravures profondes [14]. Le nitrure de silicium est obtenu à partir de procédés de dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD, plasma-enhanced chemical vapor deposition) ou à basse pression (LPCVD, low-pressure chemical vapor deposition).

Les matériaux utilisés pour la fabrication de composants MEMS, autres que le silicium et ses composés, sont:

- les couches minces métalliques déposées par pulvérisation, évaporation ou en phase vapeur chimique telles que: l'aluminium, l'or, le platine, le chrome, le titane;
- les couches de métaux ou d'alliages métalliques obtenus par dépôt électrolytique telles que l'argent, le platine, l'or, l'iridium, le nickel, le cuivre, le nickel/chrome, le (NiCr), le nickel/fer (Ni_xFe_y, Permalloy™);
- les couches de polymères telles que les polyimides, les photorésines standards ou spéciales (résine SU-8...), déposées par centrifugation au moyen d'une tournette et durcies par insolation au rayonnement ultra-violet;
- les substrats de verre (Pyrex ®) ou de quartz qui peuvent être scellés au silicium par soudure anodique et sur lesquels des couches minces métalliques peuvent être mises en forme par photolithographie;
- les substrats SOI (silicium sur isolant), les semiconducteurs III-V (InP, GaAs, AlGaAs...), le diamant, le carbure de silicium (SiC) et tungstène, les céramiques tels que les cristaux piezoélectriques de zirconate de titane (PZT), les alliages à mémoire de forme tel que le nickel-titane (Nitinol™) [5,14].

1.3.2 Les techniques de microfabrication et de micro-usinage

La technologie des MEMS utilise plusieurs techniques de microfabrication développées à l'origine pour l'industrie microélectronique:

- le dépôt de couches minces via différents procédés incluant le dépôt chimique en phase vapeur à basse pression (LPCVD), et activé par plasma (PECVD), par résonance électronique cyclotronique (ECR-PECVD) ou par laser (LCVD), l'oxydation thermique (SiO_2), le dépôt d'isolants diélectriques et de matériaux organiques au moyen d'une tournette (SOG, spin-on glass), le dépôt en phase vapeur par procédé physique (PVD) tels que l'évaporation thermique, la pulvérisation cathodique ou par faisceau d'ions, l'ablation laser (PLD), l'épitaxie par jets moléculaires (MBE, molecular beam epitaxy), etc [15,16].
- le retrait de couches minces par gravure chimique liquide ou par gravure plasma et assistée par ions réactifs (RIE, reactive ion etching) en utilisant des procédés de définition de motifs tels que la lithographie optique, la lithographie par faisceau d'électrons, par rayons X ou à l'aide d'un rayonnement synchrotron [9].

Les techniques utilisées en microélectronique sont destinées à produire des circuits plans (2D). Par conséquent, de nouvelles techniques de micro-usinage ont été développées spécifiquement pour la réalisation de structures MEMS en trois dimensions (3D). Il existe principalement deux types de micro-usinage: le micro-usinage de surface (surface micromachining) et le micro-usinage en volume (bulk micromachining).

1.3.2.1 Micro-usinage de surface des MEMS

Le micro-usinage de surface est illustré à la figure 1.5 pour la fabrication d'une structure en porte-à-faux. Une couche mince structurelle est déposée au dessus d'une couche sacrificielle qui permet de séparer du substrat de silicium, la partie de la structure destinée à être suspendue (figure 1.5a). Le retrait de la couche sacrificielle permet d'obtenir une structure en porte-à-faux ancrée sur le substrat et dont une partie est suspendue au-dessus de celui-ci.

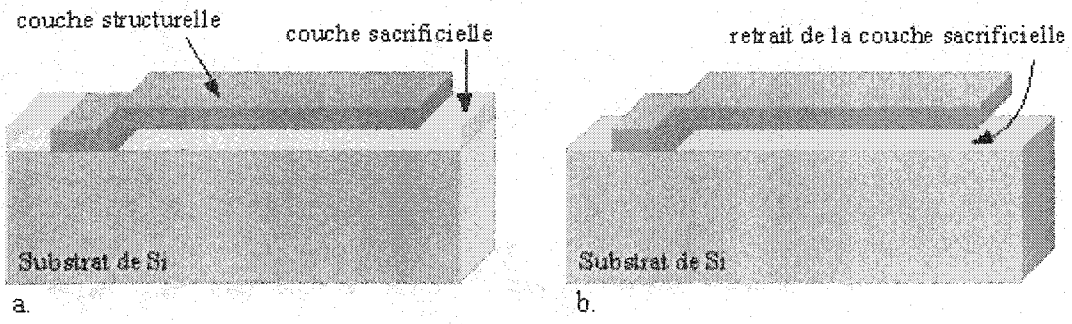


Figure 1.5: Exemple d'une structure en porte-à-faux fabriquée selon un procédé additif avec un micro-usinage de surface.

La fabrication de structures MEMS suivant le procédé de micro-usinage de surface utilise souvent une couche structurelle en polysilicium et une couche sacrificielle en oxyde de silicium. Le matériau sacrificiel est ensuite gravé sélectivement par HF pour libérer la microstructure en polysilicium. Le micro-usinage de surface est donc un procédé additif qui consiste à ajouter et mettre en forme des couches minces puis retirer une couche sélectionnée pour fabriquer des structures sur la surface du substrat.

1.3.2.2 Micro-usinage en volume des MEMS

La fabrication d'une structure en porte-à-faux selon la technique de micro-usinage en volume est illustrée sur la figure 1.6. Une couche mince est directement déposée sur le substrat et mise en forme de manière à laisser des ouvertures permettant un accès direct vers le silicium (figure 1.6a). Une cavité est ensuite micro-usinée dans le silicium de façon à libérer la structure en porte à faux du substrat. Le micro-usinage en volume implique l'extraction d'une région significative du substrat et peut donc être défini comme un procédé de soustraction.

Il existe plusieurs techniques de gravure utilisées pour le micro-usinage en volume du silicium. La méthode de gravure est choisie en fonction des principales caractéristiques de l'agent de gravure incluant sa sélectivité par rapport aux masques (SiO_2, Si_3N_4...) et autres matériaux déposés (tels que les métaux), sa vitesse de gravure, le degré de rugosité de la surface gravée, la possibilité d'avoir une méthode d'arrêt de gravure ainsi que la toxicité et le coût du produit etc. Les techniques de gravure pour libérer les microstructures sont souvent utilisées en post-traitement pour des composants contenant également des circuits CMOS avec des niveaux

de métallisation en aluminium. Ceci impose des contraintes significatives sur le choix de la technique de gravure qui doit être à la fois compatible avec les circuits intégrés et permettre la fabrication de microstructures sur le même substrat.

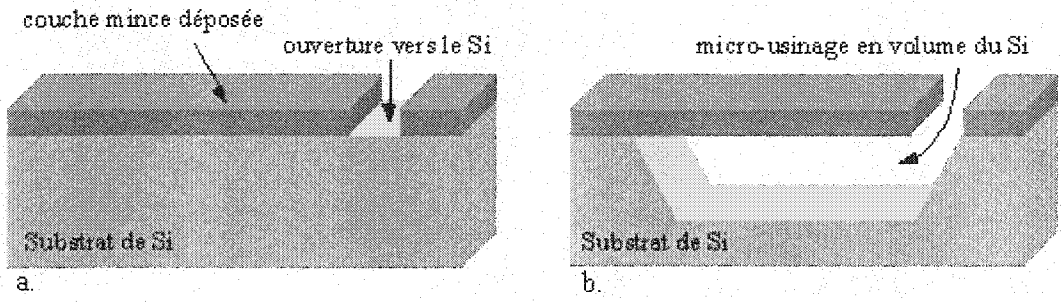


Figure 1.6: Exemple d'une structure en porte-à-faux fabriquée selon un procédé soustractif avec un micro-usinage en volume.

La gravure humide peut être isotrope ou anisotrope et s'effectue en immergeant l'échantillon dans un bain de liquide de gravure chimique. La gravure est dite isotrope lorsque le silicium est attaqué avec le même taux de gravure dans toutes les directions. Du matériau est donc retiré sous le masque de gravure, en sous-gravant au même taux qu'au travers du matériau. La solution de gravure isotrope du Si la plus courante est composée d'un mélange d'acide fluorhydrique (HF), d'acide nitrique (HNO_3) et d'acide acétique (CH_3COOH) connu sous le nom HNA [4]. Les motifs gravés dans le silicium ont des formes arrondies telles qu'illustrées sur la figure 1.7. Dans des canaux longs et étroits, la réaction est limitée par le transport de masse des réactants et/ou des produits et, dans ce cas, le recours à un agitateur permet d'obtenir des profils parfaitement hémisphériques.

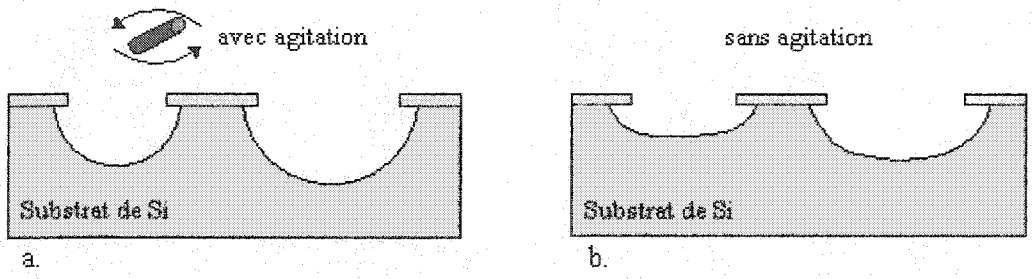


Figure 1.7: Profils de gravure isotrope obtenus dans un substrat de silicium avec (a) et sans agitation de la solution de gravure chimique (b).

La gravure est dite anisotrope lorsque différents plans cristallins du silicium sont gravés avec des taux de gravure différents. Les solutions de gravures anisotropes gravent préférentiellement les plans {100} et très lentement les plans {111}. Les masques sont souvent fabriqués en oxyde de silicium pour des durées de gravures courtes. Tandis que pour de plus longues périodes, le nitrure de silicium est un meilleur masque à cause de son taux de gravure généralement moins élevé. La gravure anisotrope permet un meilleur contrôle sur la forme des motifs 3D micro-usinés dont la hauteur maximale est seulement limitée par l'épaisseur de la gaufre de silicium. Pour la gravure anisotrope, les solutions aqueuses les plus connues sont: l'hydroxyde de potassium (KOH), l'éthylène diamine pyrocatéchol (EDP ou EPW, $NH_2(CH_2)_2NH_2$+$(C_6H_4(OH)_2)$, l'hydroxyde de tétraméthylammonium (TMAH, $(CH_3)_4NOH$) pour lequel la procédure de gravure est décrite dans l'annexe D et l'hydroxyde d'ammonium (NH_4OH). Les profils de gravure anisotropes obtenus pour deux orientations différentes du substrat de silicium sont illustrés sur la figure 1.8.

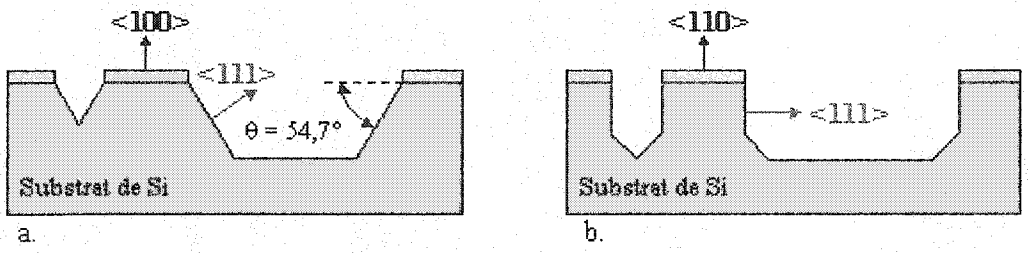


Figure 1.8: Profils de gravure anisotrope obtenus suivant l'orientation cristalline {100} ou {110} du substrat de silicium.

Une gravure sèche pour le micro-usinage de structures MEMS peut être réalisée en phase gazeuse, par plasma ou assistée d'ions réactifs ou par faisceau d'ions (ion milling). Les gaz utilisés pour la gravure isotrope du Si sont entre autres: le difluorure de xénon (XeF_2) pour lequel la procédure est décrite dans l'annexe D et le trifluorure de brome (BrF3) [17]. Les systèmes de gravure plasma/ions réactifs (RIE, reactive ion etching) utilisent une énergie externe telle qu'une source radio-fréquence (RF). La réaction de gravure est privilégiée dans la direction de transport des ions réactifs qui sont accélérés vers le matériau à graver. Les gaz réactifs utilisés pour la gravure du silicium sont: le Freon™ 13 ($CClF_3$) avec du chlore (Cl_2), le Freon™ 14 (CF_4) avec de l'hydrogène (H_2), le SF_6, le NF_3, le CCl_4, Freon™ 115 (C_2ClF_5). Les gaz composés de chlorofluorocarbones (CFC) ont été généralement exclus suite à l'accord signé à Montréal sur la protection de la couche d'ozone. Des gravures profondes du silicium avec un degré

d'anisotropie élevé peuvent être réalisées à l'aide d'un système DRIE (deep reactive ion etching) permettant des rapports d'aspect allant jusqu'à 30:1 (parois verticales à 90±2°) [6]. Ainsi, contrairement aux techniques de gravure humide, la gravure par plasma/ions réactifs n'est pas limitée par les plans cristallins du Si.

1.3.2.3 Procédé LIGA

Le procédé LIGA, acronyme allemand de lithographie (lithographie), électrodéposition (galvanoformung) et moulage (abformung), permet de fabriquer des microstructures à fort rapport d'aspect de l'ordre de 100:1. Une lithographie à rayons X profonds est utilisée pour insoler une photorésine épaisse telle que le PMMA (polyméthylméthacrylate) au travers d'un masque composé d'une fine couche mince d'or déposée sur un masque en nitrure de silicium ou polysilicium. Les régions insolées de la photorésine sont ensuite dissoutes au moyen d'un développeur. Par conséquent, le restant de photorésine constitue un moule prêt à recevoir le métal généralement du nickel électroplaqué. La photorésine est ensuite retirée de la surface de l'échantillon par gravure plasma à l'oxygène ou à l'aide de solvants chimiques [9,14]. La figure 1.9 est une illustration des étapes du procédé LIGA.

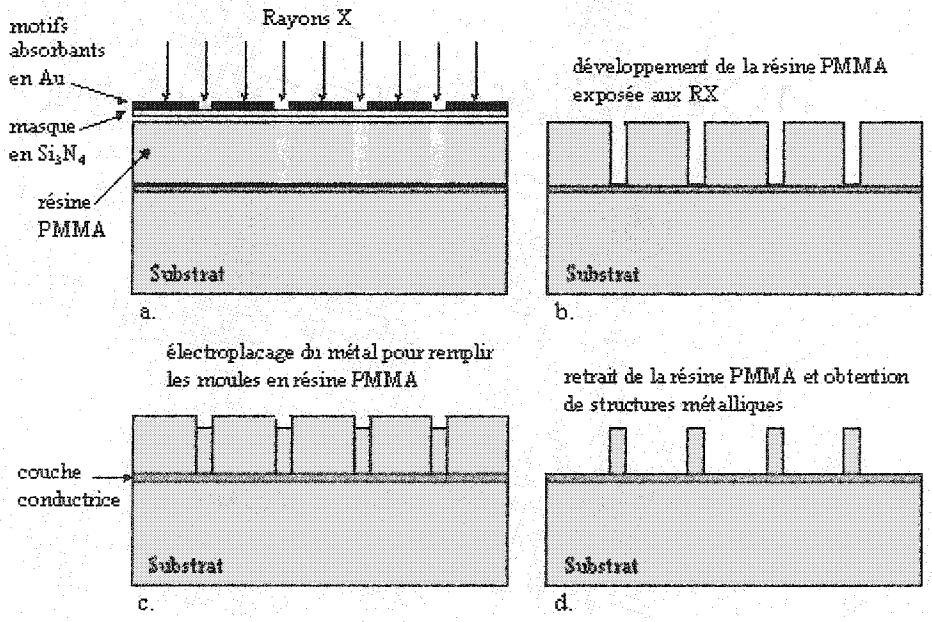


Figure 1.9: Les étapes de fabrication du procédé LIGA.

Le coût de fabrication du procédé LIGA est élevé du fait qu'il nécessite notamment une source de radiation synchrotron. Son utilisation avec des photorésines standards et une lithographie UV permet de réduire les coûts mais ne peut atteindre les performances en résolution obtenues en utilisant des rayons X.

Plusieurs autres techniques et procédés sont également utilisés pour la microfabrication de composants MEMS tels que: la méthode de dépôt sol-gel, la gravure par faisceau d'ions focalisé (FIB, focused ion beam milling), la gravure chimique assistée par laser, la soudure anodique, le polissage et le polissage mécanico-chimique (CMP), le procédé SCREAM (Single crystal reactive ion etching and metallization), la stéréolithographie pour créer des structures 3D couche par couche à partir de modèles CAD (conception assistée par ordinateur) etc [9].

1.4 Domaines d'application du microactuateur bistable

Cette thèse de doctorat a été réalisée au Laboratoire pour l'Intégration de Senseurs et d'Actuateurs (LISA), fondé en 1992 par le professeur J.F. Currie. Plusieurs travaux de recherche du laboratoire LISA se sont orientés vers les micro-dispositifs thermiques intégrés en couches minces tels que des capteurs de gaz [18-20] et des capteurs thermiques [21]. Un brevet d'invention du laboratoire LISA, concernant un micro-administrateur pharmaceutique [22], a conduit en premier lieu à un projet d'étude sur la gravure anisotrope [23] pour la microfabrication de micro-cavités destinées à contenir des médicaments à des nano-doses. Les micro-cavités étant encapsulées, le développement de microactuateurs était nécessaire afin de rompre les membranes et libérer les médicaments. Le sujet de recherche de cette thèse a donc pris naissance mais ne se limitait pas à cette unique application biomédicale. En effet, le développement de ces nouveaux types de micro-commutateurs permettait aussi d'entrevoir une autre application à long terme: remplacer les commutateurs conventionnels à base de relais électromécaniques par des matrices de micro-relais pouvant être commandés à distance. Les deux applications potentielles du microactuateur sont décrites dans cette section.

1.4.1 Intégration à un micro-administrateur pharmaceutique

1.4.1.1 Besoin du marché pharmaceutique

Pour le traitement de certaines maladies chroniques, il n'est pas encore possible d'administrer un médicament à un patient sur une longue durée, de façon contrôlée et périodique, sans diminuer sa qualité de vie. Prenons l'exemple du diabète qui résulte du fait que le pancréas ne peut fournir suffisamment d'insuline pour réguler le taux de glucose dans le sang. Dans les cas de diabète insulino-dépendant (type 1), des injections dosées d'insuline à action rapide au moyen d'une seringue doivent être administrées avant tout repas afin de réguler adéquatement le taux de glycémie. Pour le traitement du diabète non-insulino-dépendant (type 2), la prise de médicaments oraux est nécessaire pour stimuler la production d'insuline par le pancréas ou accroître son efficacité. De nombreuses maladies chroniques résultent d'un déséquilibre au niveau de certaines protéines telles les hormones et les enzymes. Dans le cas du diabète, l'insuline est la protéine qui gère le niveau de glucose dans le sang et son injection dans le corps permet de remplacer la fonction déficiente du pancréas.

Les progrès effectués en biotechnologie et en biologie moléculaire ont permis la synthèse de peptides (molécules constituées par l'union d'un petit nombre de molécules d'acides aminés) qui ont prouvé leur efficacité clinique mais dont l'utilisation reste limitée à cause de leurs propriétés. Les peptides doivent être administrés à des nano-doses, ont une durée de vie courte, une volatilité en solution et une absorption erratique. En effet, ces nouveaux types de médicaments sont stables en phase solide mais extrêmement instables en phase liquide. Leur temps de demi-vie dans un milieu liquide est de l'ordre de quelques minutes et parfois même quelques secondes. Par conséquent, les techniques d'administration pharmaceutiques traditionnelles sont inadéquates pour ce genre de médicaments. Il existe donc un réel besoin de développer une nouvelle technique permettant de délivrer de façon périodique des médicaments en phase solide et en quantité contrôlée. Pour répondre à ce besoin, un micro-administrateur pharmaceutique a été conçu et breveté par J.F. Currie *et al.*[22].

1.4.1.2 Le micro-administrateur pharmaceutique (MAP)

Le micro-administrateur pharmaceutique (MAP) est un micro-dispositif de quelques mm^2, implantable dans le corps humain ou animal, permettant l'administration périodique de médicaments en phase solide et en quantité contrôlée à des nano-doses [24]. Pour les méthodes d'administration conventionnelles telles que la seringue, il est nécessaire d'injecter une quantité massive de médicament pour éviter d'une part, de faire des injections trop souvent et, d'autre part, pour obtenir une dose thérapeutique suffisante au niveau de l'organe cible tel qu'illustré sur la figure 1.10. Au contraire, le dispositif MAP permet l'administration périodique de petites doses de médicaments destinés à être rapidement assimilés par l'organisme vivant afin de rétablir l'équilibre hormonal.

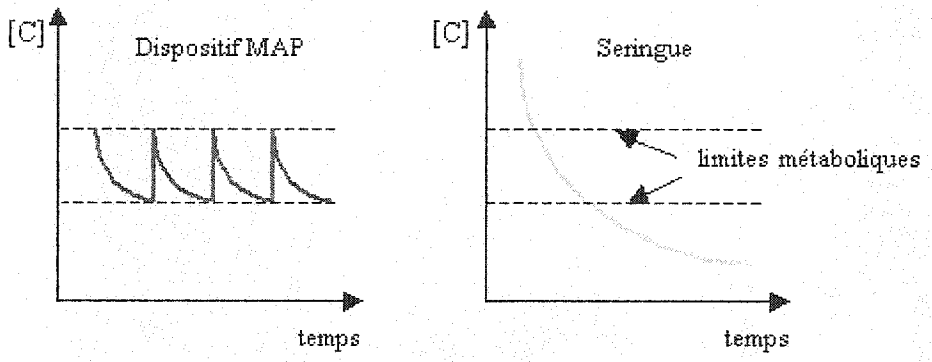


Figure 1.10: Doses de médicaments administrées au moyen d'une seringue et du micro-administrateur pharmaceutique.

Le dispositif MAP, présenté sur la figure 1.11, est composé d'une multitude d'alvéoles réservoirs qui sont des cavités micro-usinées dans un substrat de silicium dont la taille peut être ajustée au moyen d'une technique de gravure anisotrope [23]. Chaque alvéole est remplie de médicament à l'état solide puis, scellée par une fine membrane de quelques micromètres d'épaisseur pouvant être rompue individuellement au moyen d'un microactuateur.

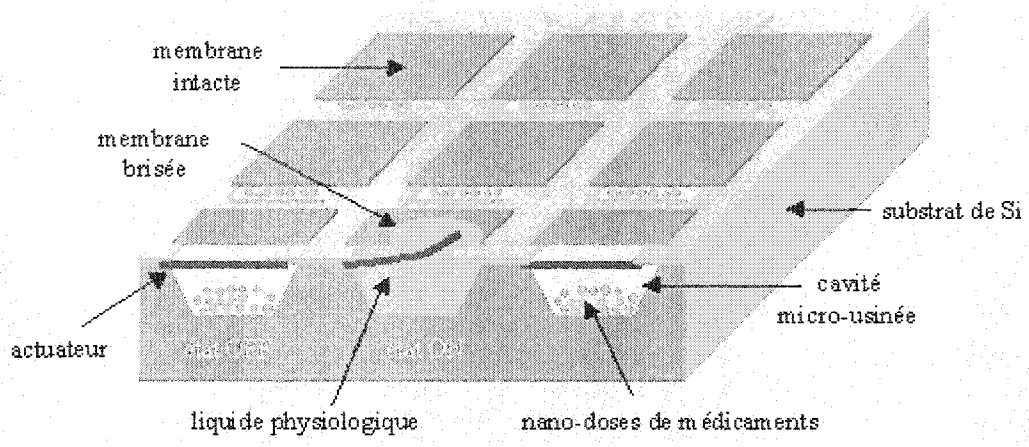


Figure 1.11: Micro-administrateur pharmaceutique avec des micro-cavités remplies de médicament solide à des nano-doses.

Le microactuateur électrothermique bistable, conçu lors de cette thèse, peut donc être utilisé pour rompre la membrane et libérer le médicament. L'entrée des liquides physiologiques dans la cavité permettra la dissolution du médicament solide stocké. Par conséquent, initialement tous les microactuateurs doivent se trouver "bloqués" pour empêcher l'ouverture des membranes et la libération les doses de médicaments tant qu'ils n'ont pas reçu le signal de commande. Pour ceci, un circuit de contrôle permet d'adresser les signaux électriques nécessaires au changement d'état de l'actuateur visé. L'activation du microactuateur permet son dégagement de la butée et sa déflexion verticale vers la haut résulte de la relaxation des contraintes internes résiduelles. La force générée à l'extrémité de la poutre permettra la rupture de la membrane. Pour cette application biomédicale, le microactuateur doit agir une seule fois pour libérer la dose de médicament correspondante (passer de son état "bloqué" à son état "libre" pour rompre la membrane sans nécessiter le retour à son état initial).

Une pile électrochimique en couches minces peut être intégrée sur la même puce que l'électronique de contrôle et l'ensemble des microactuateurs et alvéoles afin d'alimenter le système au complet. Tel qu'illustré sur la figure 1.12, au moyen d'un système de communication radiofréquence, il sera possible de modifier à distance l'horaire d'administration des médicaments. Le dispositif MAP figure parmi les premières inventions visant l'administration de médicaments sous forme solide à des micro ou nano-doses [22]. Par ailleurs, grâce à sa petite taille, l'implantation de ce dispositif ne nécessite pas de chirurgie importante.

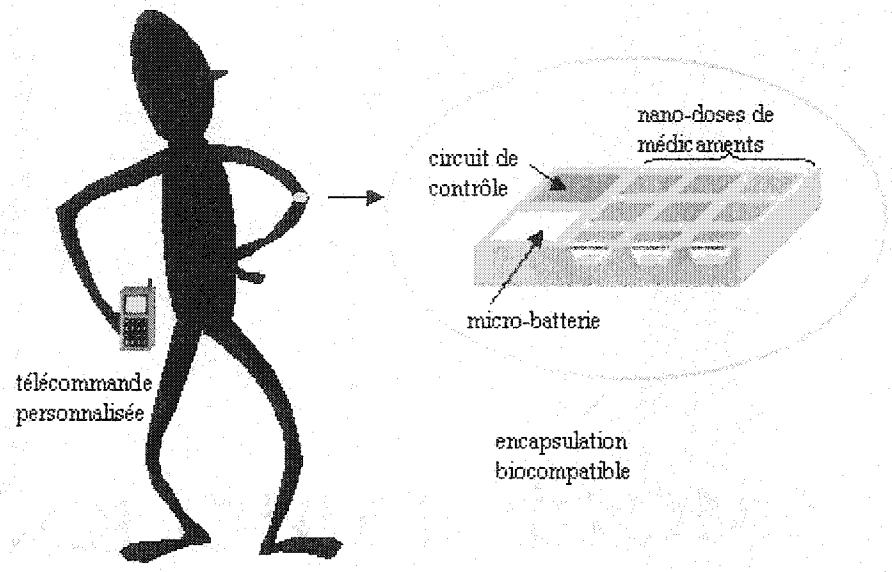


Figure 1.12: Modification des horaires de libération des médicaments du dispositif MAP à l'aide d'une télécommande personnalisée.

Pour les dispositifs qui entrent en contact avec les fluides du corps humain ou qui y sont implantés, des questions de biocompatibilité et de biorésistance doivent être considérées. La biocompatibilité se réfère à la capacité des matériaux de fonctionner dans un milieu biologique sans affecter de façon défavorable, les cellules ou les tissus (par exemple, en provoquant des réponses inflammatoires ou en répandant des composés toxiques). La biorésistance se réfère à la capacité des matériaux à résister à la sévérité des environnements chimiques confrontés dans de tels cadres (par exemple une attaque corrosive par les cellules et fluides du corps) [24]. Les matériaux usuellement employés pour le micro-usinage ne sont souvent pas les meilleurs pour de telles applications. Par conséquent, un travail considérable dans le domaine des couches de revêtements ainsi que des méthodes de modification de surface est nécessaire. Par exemple, afin d'éviter que la membrane ne parte en éclats en laissant des débris potentiellement dangereux dans l'organisme vivant, un revêtement biocompatible permettrait de laisser passer uniquement les liquides physiologiques pourrait être une solution. Le microactuateur doit donc rompre une membrane pour permettre l'entrée des liquides physiologiques qui vont dissoudre les médicaments; tandis que le revêtement biocompatible placé au-dessus de la membrane, empêchera tout élément solide de pénétrer dans l'organisme vivant.

1.4.2 Micro-relais pour les télécommunications

1.4.2.1 Gestion de la boucle locale de cuivre

L'application dans le domaine des télécommunications du microactuateur électrothermique bistable a pour but de remplacer les commutateurs conventionnels par des micro-relais intégrés pouvant être commandés à distance. Actuellement, pour le branchement d'une ligne téléphonique standard (analogique) dans une résidence, un technicien doit installer une ligne physique avec un commutateur manuel avant qu'un numéro de téléphone ne soit attribué au nouvel abonné. La prise téléphonique chez le client est raccordée à un central téléphonique local par l'intermédiaire d'une paire de fils de cuivre qui lui est dédiée. La boucle locale est donc la paire de fils de cuivre qui relie la ligne de l'usager au répartiteur d'abonnés le plus proche qui concentre l'ensemble des lignes d'usagers avant de les envoyer au central de commutation. La boucle locale qui se situe donc sur le dernier mile d'un réseau de télécommunication est une infrastructure permettant de fournir des services de télécommunications de détail tels que les services de téléphonie fixe proposés aux abonnés ou les services de télécommunications à haut débit tels que les services DSL (digital subscriber line).

1.4.2.2 Matrice de micro-relais intégrés commandés à distance

L'objectif est de remplacer les relais électromécaniques utilisés dans les panneaux de commutation en téléphonie par exemple, par des matrices de micro-relais pouvant être commutés à distance. Le projet de recherche s'est donc orienté vers le développement d'une matrice composée d'un nouveau type de micro-commutateur conçu avec un procédé de fabrication compatible avec ceux de la microélectronique, ceci dans la perspective d'une production en grand volume à faible coût. L'élément de base de cette matrice est le microactuateur électrothermique bistable conçu dont les positions stables ne nécessitent pas de puissance ou de courant appliqué en permanence pour être maintenues. De ce fait, les états des microactuateurs ne sont pas changés en cas de coupure de courant ou de surtension. La matrice de micro-commutateurs est amenée à faire des connexions entre des lignes de téléphones et des lignes commandées par un central téléphonique. Sachant que chaque ligne de téléphone est en fait constituée d'une ligne aller et retour (paire de fils de cuivre), deux microactuateurs sont

placés aux intersections entre les lignes d'entrées (lignes de téléphone) et les lignes de sorties (lignes du central). La figure 1.13 illustre (pour N = 3) une matrice de micro-relais N par N permettant de commuter le signal d'une ligne d'entrée parmi N vers une ligne de sortie parmi N.

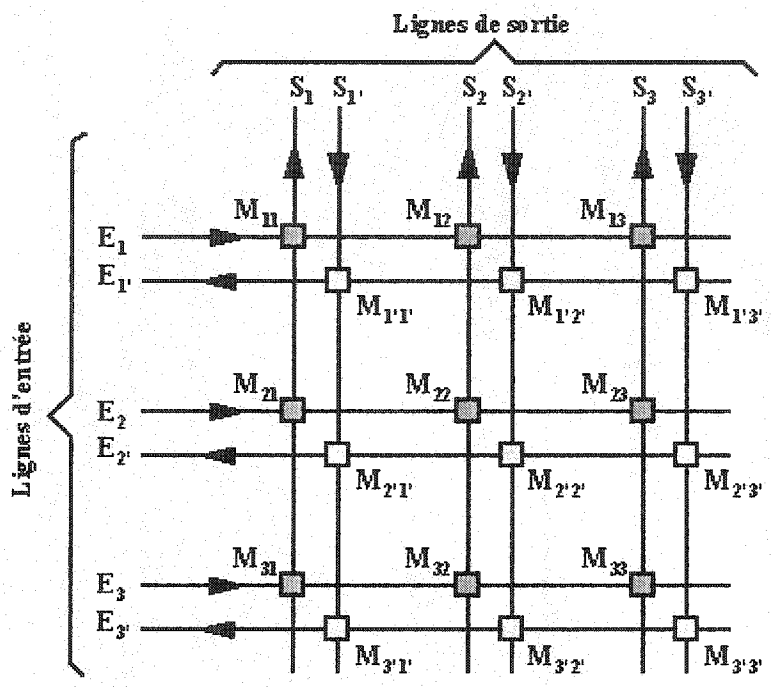


Figure 1.13: Matrice de micro-relais 3 par 3 permettant l'interconnexion entre des lignes d'entrée avec des lignes de sortie au moyen de micro-commutateurs.

Pour i variant de 1 à N, chaque entrée E est constituée d'une ligne aller E_i et d'une ligne retour $E_{i'}$. De la même façon, pour j variant de 1 à N, chaque sortie S est composée d'une ligne aller S_j et d'une ligne retour $S_{j'}$. Par conséquent, à chaque intersection des lignes d'entrée et de sortie se trouvent deux micro-commutateurs M_{ij} et $M_{i'j'}$, pour établir les interconnexions. Le circuit de contrôle, relié à la matrice de microactuateurs, permet d'effectuer les commutations aux intersections des lignes d'entrée et de sortie, sélectionnées au préalable à l'aide d'une information en entrée de 6 bits. Le système d'adressage microélectronique est composé de transistors agissant comme des interrupteurs au niveau de chaque ligne et de chaque colonne pour envoyer l'alimentation nécessaire à l'actuation des microactuateurs au moyen de lignes de contrôle. Les micro-commutateurs sont amenés à effectuer un nombre faible de commutations du fait que le branchement d'une ligne téléphone s'effectue en moyenne une fois par an.

1.5 Objectifs et organisation de la thèse

1.5.1 Objectifs du projet de recherche

L'objectif spécifique de cette thèse est d'étudier l'implémentation d'une matrice de microactuateurs bistables au moyen d'un procédé standard CMOS. Le choix de cette technologie offre la possibilité d'intégrer sur le même substrat un système d'adressage microélectronique qui permet de contrôler directement la matrice d'actuateurs. Les principaux objectifs visés et les défis technologiques à résoudre pour la mise en œuvre de ce dispositif de type CMOS MEMS, sont les suivants:

- **Objectif 1:** Concevoir un nouveau type de microactuateur bistable qui permet d'effectuer un mouvement vertical et ne nécessite pas une alimentation électrique permanente pour conserver son état.

Défi: Une grande majorité des microactuateurs développés selon la technologie des MEMS ont une seule position stable ou nécessitent l'application d'une puissance électrique permanente pour maintenir leurs états stables. Le défi ici est de concevoir un microactuateur avec un design robuste qui permet d'avoir deux positions mécaniquement stables, utilise un principe d'actuation fiable et nécessite une faible alimentation électrique. L'actuateur doit effectuer une déflexion verticale de manière à rompre une membrane située au-dessus de lui pour son application au dispositif MAP. Tandis que pour son application en tant que micro-relais, il doit permettre la connexion ou l'isolation de lignes électriques.

- **Objectif 2:** Concevoir la fabrication monolithique d'une matrice d'actuateurs à partir d'une technologie standard CMOS permettant l'intégration d'un système d'adressage microélectronique sur le même substrat.

Défi: Les technologies CMOS sont développées et optimisées pour la fabrication exclusive de circuits intégrés. Le défi revient à concevoir et fabriquer un microactuateur fonctionnant suivant nos spécifications à partir des couches minces d'un procédé standard CMOS ayant une séquence de dépôt donnée. La grande difficulté de travailler avec un procédé

CMOS commercial concerne la non divulgation des propriétés (mécaniques, thermiques...) des couches minces déposées, leurs compositions et leurs épaisseurs exactes. De plus, le design de structures MEMS est vulnérable vis à vis des variations dans les procédés utilisés pour le dépôt et la mise en forme des couches minces CMOS.

- **Objectif 3:** Concevoir et optimiser une stratégie de micro-usinage qui permet de libérer les microactuateurs du substrat sans les endommager tout en étant compatible CMOS.

Défi: Le design du microactuateur en technologie CMOS doit également tenir compte des caractéristiques des agents de gravure utilisés en post-traitement. Le défi à relever est de développer une stratégie de micro-usinage pour de grandes structures MEMS (longueur ~ 1000 µm) avec des couches minces CMOS dont le comportement vis à vis des agents de gravure peut différer de celui attendu et aussi varier d'une série de fabrication à une autre. Le design du microactuateur et les techniques de micro-usinage post-CMOS doivent donc être optimisés de manière à obtenir des microstructures intactes à la fin du post-traitement.

- **Objectif 4:** Caractériser et modéliser l'actuation du microactuateur afin de déterminer ses conditions de fonctionnement optimales.

Défis: Les structures libérées sont caractérisées par une déflexion naturelle vers le haut qui résulte de la relaxation des contraintes internes dans les couches minces qui les constituent. Le premier défi est de modéliser cette déflexion initiale en fonction de paramètres fournis par la fonderie ou publiés. Le second défi est de développer un modèle analytique de l'actuation thermique de notre microactuateur qui tient compte de sa déflexion initiale, de son design comportant différentes sections (bilames, pad-court-circuiteur etc.) et de ses modes de chauffage localisés. Ce modèle doit être suffisamment précis pour pouvoir déterminer la plage de paramètres qui assurent le fonctionnement bistable du dispositif et proposer ainsi d'autres designs compatibles avec le procédé CMOS.

1.5.2 Organisation de la thèse

L'organigramme de la figure 1.14 résume l'organisation des chapitres de cette thèse en fonction des objectifs énoncés précédemment.

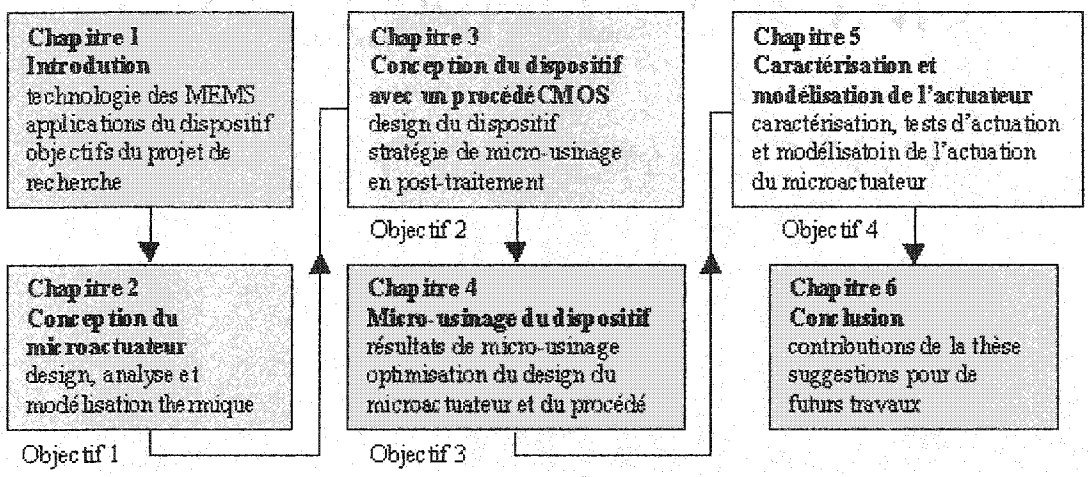


Figure 1.14: Organigramme présentant l'organisation des chapitres de la thèse

Le chapitre 1: Introduction,

comporte une introduction générale sur les MEMS, les applications potentielles du microactuateur conçu et une description des objectifs du projet de recherche.

Le chapitre 2: Conception et design du microactuateur électrothermique bistable,

présente le design innovateur du microactuateur selon des considérations électrothermiques et thermomécaniques avec une modélisation thermique dans l'air ambiant et le vide.

Le chapitre 3: Conception de la microfabrication du dispositif en technologie CMOS,

montre la fabrication en couches minces du microactuateur à l'aide d'une technologie standard CMOS et la stratégie de micro-usinage conçue pour le post-traitement ainsi qu'une description des techniques utilisées.

Le chapitre 4: Micro-usinage de l'actuateur: mesures, résultats et discussion,

présente les mesures et les principaux résultats expérimentaux obtenus aux différentes étapes de microfabrication ayant permis une optimisation du design du microactuateur et du procédé de micro-usinage.

Le chapitre 5: Caractérisation, tests d'actuation et modélisation de l'actuateur,

inclut une caractérisation de la structure en porte-à-faux libérée, les tests d'actuation et une modélisation de son comportement électro-thermo-mécanique.

Le chapitre 6: Conclusion, contributions et suggestions pour de futurs travaux,
met l'accent sur les contributions de la thèse à l'avancement des connaissances et au développement des technologies et identifie les nouvelles voies de recherche.

1.6 Conclusions du chapitre 1

Les systèmes micro-électro-mécaniques commencent à avoir un impact majeur sur plusieurs domaines d'application tel qu'il a été décrit dans ce chapitre. Les projections de marché des MEMS sont prometteuses parce que ces composants miniaturisés permettent d'améliorer les performances des dispositifs actuels ou d'innover en offrant de nouvelles fonctionnalités tout en réduisant les coûts de fabrication. Les nombreuses techniques de microfabrication disponibles, empruntées à l'industrie microélectronique ou développés par la communauté de micro-usinage, permettent de fabriquer une grande variété de microstructures. Dans ce contexte, le but spécifique de cette thèse de doctorat était d'étudier l'implémentation d'un nouveau type de microactuateur électrothermique bistable, à l'aide d'un procédé standard CMOS et d'un post-traitement compatible CMOS. Le microactuateur peut être intégré au micro-administrateur pharmaceutique MAP ou utilisé en tant que micro-relais pour effectuer des commutations en téléphonie.

CHAPITRE 2

CONCEPTION ET DESIGN DU MICROACTUATEUR ÉLECTROTHERMIQUE BISTABLE

2.1 Introduction

Les systèmes micro-électro-mécaniques peuvent s'appliquer à un grand nombre de domaines d'application. L'utilisation de la technologie des MEMS pour la fabrication de micro-relais est l'une des applications ayant fait l'objet de nombreux projets de recherche et de développement. Le dispositif conçu dans le cadre de cette thèse de doctorat, comprend une matrice de microactuateurs électrothermiques bistables qui sont amenés à jouer le rôle de micro-commutateurs que ce soit pour son application au dispositif MAP ou pour relier des lignes téléphoniques à des lignes de centrales téléphoniques.

Ce chapitre débute par un aperçu des différents types de microactuateurs existants ou en cours de développement dans la catégorie du microactuateur conçu (micro-commutateur, compatible CMOS et à actuation électrothermique). Le principe de fonctionnement et les avantages du nouveau type de microactuateur électrothermique fabriqué sont ensuite décrits. Le design du microactuateur comprenant deux résistances de chauffage et un pad court-circuiteur est également présenté suivant différentes considérations électro-thermo-mécaniques. Les pertes thermiques dans le cas d'une structure bimorphe chauffée sont ensuite analysées. Tandis que la modélisation thermique du microactuateur, est présentée à la fin de chapitre.

2.2 État de l'art sur les microactuateurs

2.2.1 Les micro-commutateurs monostables/bistables

Devant le potentiel des MEMS dans le domaine des télécommunications [25,26], plusieurs travaux de recherche se sont orientés vers la fabrication de micro-commutateurs tels que les relais électrostatiques [27-32] et les micro-relais électromagnétiques [33-35]. La figure 2.1 illustre le cas d'un micro-relais à actuation électrostatique développé par Schiele *et al.* [36]. Dans cette configuration une barre de contact, située à l'extrémité de la poutre, effectue la connexion entre deux lignes conductrices situées en dessous de la structure en appliquant une tension comprise entre 20 et 90V suivant les dimensions de la structure (figure 2.1a). La micrographie électronique à balayage montre que la poutre, fabriquée avec des couches minces de SiO_2/Au/SiO_2, possède une courbure vers le haut lorsque le contact est ouvert (figure 2.1b).

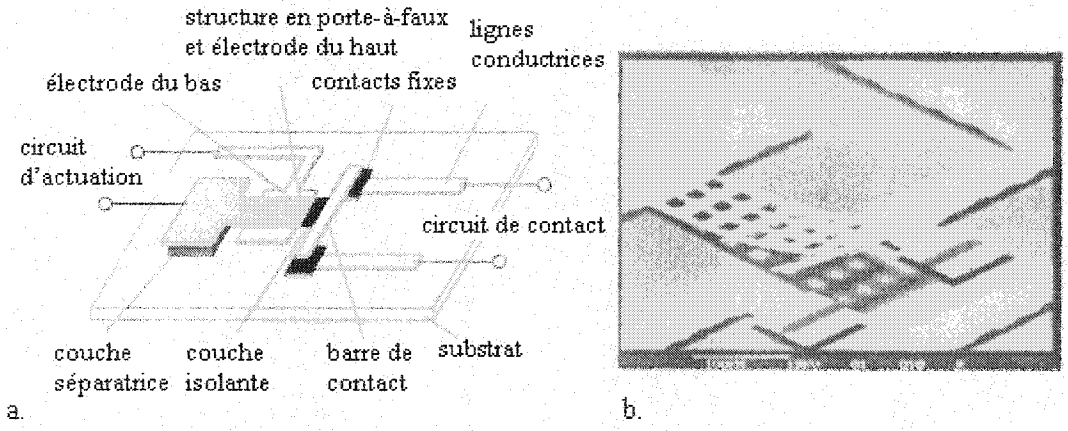


Figure 2.1: Micro-relais électrostatique: a) vue schématique et b) micrographie électronique à balayage du dispositif [36].

Les micro-relais peuvent également utiliser une activation de type thermique tel que le dispositif développé par Simon *et al.* [37] qui utilise une goutte de mercure pour effectuer le contact électrique entre deux électrodes. Le déplacement de la goutte de mercure est obtenu en générant de la vapeur d'eau dans un des réservoirs tel que montré sur la figure 2.2. Une tension de 10-15V est appliquée sur une résistance de chauffage utilisant une puissance d'alimentation de ~100 mW.

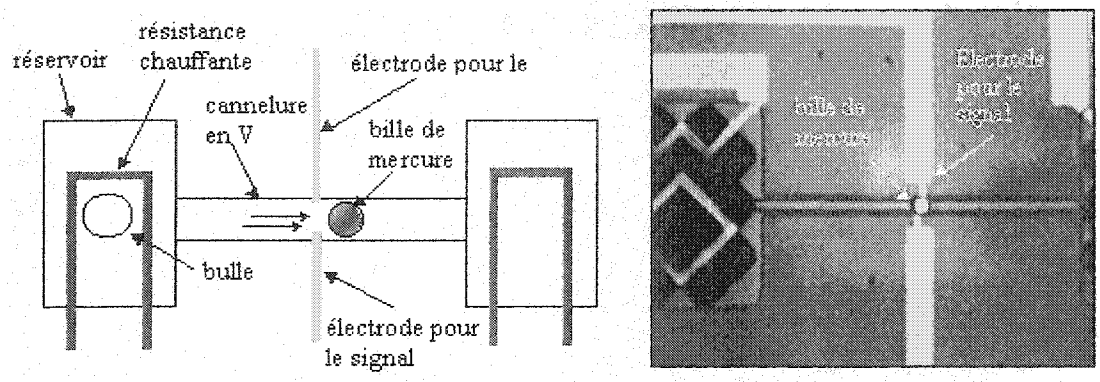


Figure 2.2: Micro-relais thermique avec une bille de mercure: a) vue schématique, b) micrographie optique du dispositif [37].

Ces actuateurs ont souvent une seule position stable et/ou nécessitent l'application d'un courant ou d'une tension en permanence pour garder leur position. Par conséquent, des groupes de recherche se sont intéressés au développement de structures MEMS bistables [38,39], susceptibles de conserver leur état même lorsque la puissance électrique est coupée. Ainsi, Matoba *et al.* [40,41] ont proposé un micro-commutateur bistable (illustré à la figure 2.3) incluant une poutre en forme de U, composée de Poly-Si/SiO_2/Poly-Si et activée par des forces d'interaction avec une bande de tension composée de Si_3N_4 reliée à son extrémité. La poutre flambe entre ses deux positions stables grâce au chauffage de la couche de polysilicium du haut ou du bas pour créer un moment de courbure supérieur et opposé à celui causé par la bande de tension qui est également chauffée pour réduire sa force de tension agissant sur poutre.

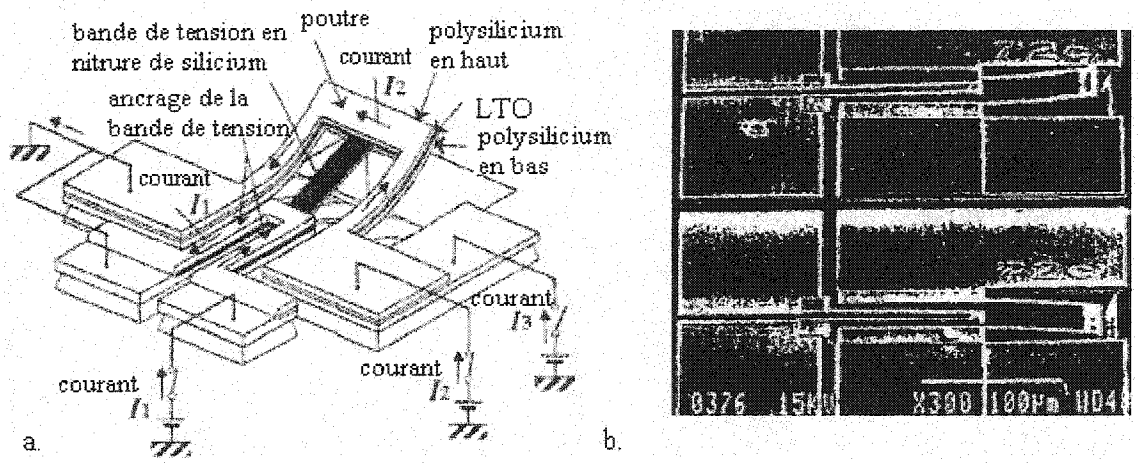


Figure 2.3: Micro-commutateur à verrouillage bistable: a) vue schématique et b) vue prise au MEB [40].

De même, Sun *et al.* [42], ont fabriqué un micro-relais bistable à l'aide d'un procédé de micro-usinage en surface utilisant du polyimide comme couche sacrificielle et des couches minces de SiO_2 (PECVD), Al et Au comme matériaux structurels. L'actuateur multimorphe est composé de deux segments activés thermiquement (NO, normally open et NC, normally closed) qui permettent de verrouiller une barre métallique située à son extrémité après deux blocs d'arrêt ancrés sur le substrat (voir figure 2.4).

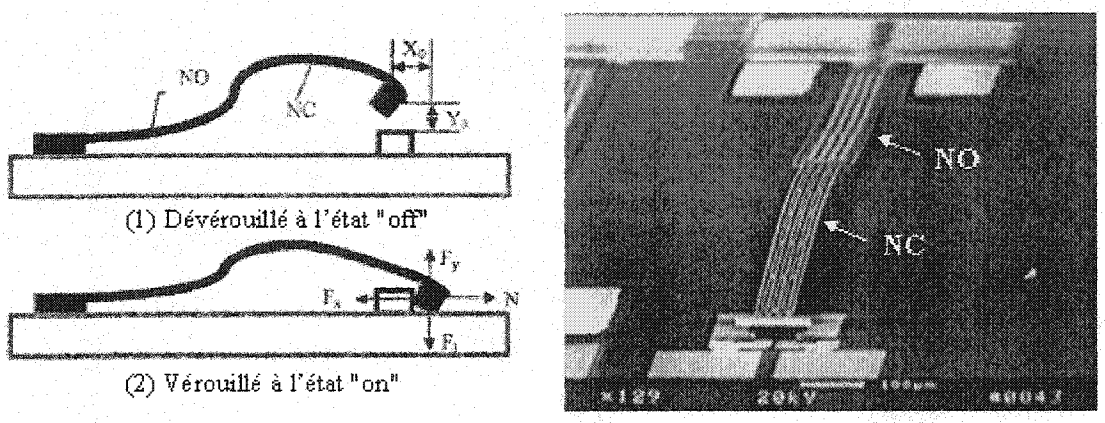


Figure 2.4: Micro-relais multimophe bistable: a) schéma des états "on" et "off" de l'actuateur b) vue prise au MEB [42].

Les micro-relais peuvent utiliser un actuateur effectuant un déplacement latéral [43] ou vertical [44] i.e. hors du plan du substrat. Contrairement aux micro-commutateurs latéraux, les micro-relais verticaux offrent une excellente résistance d'isolation et une faible résistance de contact, ce qui est requis pour la plupart des applications relais. De ce fait, les composants MEMS à actuation verticale semblent être les meilleurs candidats pour la réalisation de micro-relais [45].

2.2.2 Les microactuateurs fabriqués avec une technologie standard CMOS

Un des points clés pour l'avenir industriel des structures MEMS est leur compatibilité avec la technologie CMOS prédominante dans la fabrication des circuits intégrés (IC). En effet, l'utilisation d'un procédé standard CMOS permet une production de masse à faible coût et la possibilité d'inclure sur le même substrat des circuits intégrés pouvant communiquer directement avec les transducteurs. Par ailleurs, la taille réduite des composants MEMS et les besoins en puissance d'alimentation plus faibles, permettent de minimiser le bruit électronique (en éliminant

la résistance et la capacitance associée aux connexions entre des puces électroniques et MEMS séparées) et d'améliorer ainsi les performances du dispositif. Les acronymes IC MEMS, IMEMS (iMEMS) ou CMOS MEMS, font référence aux microsystèmes intégrés sur silicium utilisant la technologie CMOS des circuits intégrés (IC) combinées avec des étapes additionnelles de post-traitement (post-CMOS) réalisées préférablement après la séquence régulière du procédé IC [46,47]. D'autres approches technologiques proposent des traitements avant le procédé (pré-CMOS) ou intercalé à l'intérieur de celui-ci (intermédiaire-CMOS) [48,49]. Les microstructures sont donc fabriquées à partir des matériaux standards pour les IC (silicium, polysilicium, oxyde, nitrure, métal...) et utilisent les techniques de microfabrication telles que le micro-usinage en surface ou en volume et les procédés de dépôt et de mise en forme, compatibles CMOS.

Quelques prototypes CMOS MEMS, réalisés ou en cours de développement, sont présentés ci-dessous afin d'avoir un aperçu sur l'état de l'art dans cette catégorie de microsystèmes. Les structures CMOS MEMS réalisées via un micro-usinage de surface compatible CMOS [50,51] utilisent la gravure sacrificielle d'une couche diélectrique et/ou de la couche de métallisation la plus basse du procédé CMOS. Les microstructures peuvent donc être composées de polysilicium ou de couches diélectriques intermétalliques et de passivation avec la couche supérieure de métal en sandwich. De cette manière, les composants MEMS peuvent être intégrés au procédé CMOS de façon monolithique. La possibilité d'effectuer des pré-traitements (pré-CMOS) ou post-traitement (post-CMOS) permet de fabriquer des composants MEMS de façon modulaire. Les microstructures peuvent être fabriquées en premier (MEMS-first) [52] avant la séquence du procédé standard CMOS. Ainsi, Smith *et al.* [53] ont présenté un procédé de fabrication "MEMS-first" permettant d'intégrer des circuits CMOS avec des microstructures en polysilicum fabriquées à l'aide d'une technique de micro-usinage de surface en pré-traitement (pré-CMOS) tel qu'illustré schématiquement sur la figure 2.5.

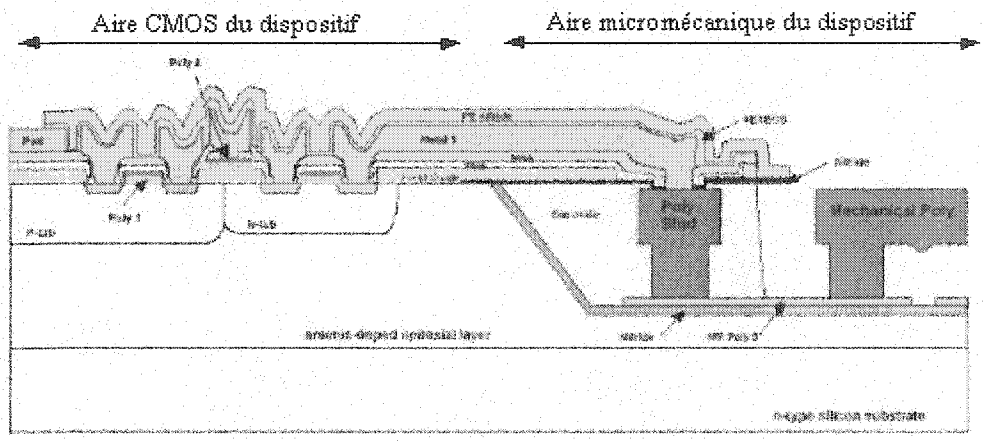


Figure 2.5: Microstructures en polysilicium fabriquées en pré-traitement à un procédé CMOS avec un micro-usinage de surface [53].

Les microstructures sont encastrées dans des couches d'oxyde, sous la surface du substrat planarisée par un polissage mécano-chimique et passivée avant que la procédure standard CMOS ne soit effectuée. Inversement, le procédé standard CMOS peut être appliqué en premier (CMOS-first) et dans ce cas, les microstructures MEMS sont fabriquées ensuite selon les techniques de micro-usinage de surface. La figure 2.6 montre la fabrication de microstructures en polysilicium (SP1 à SP3), réalisé par Bustillo *et al.* [51] par micro-usinage de surface après que le procédé standard CMOS aie été effectué (post-CMOS) et protégé par une couche de passivation.

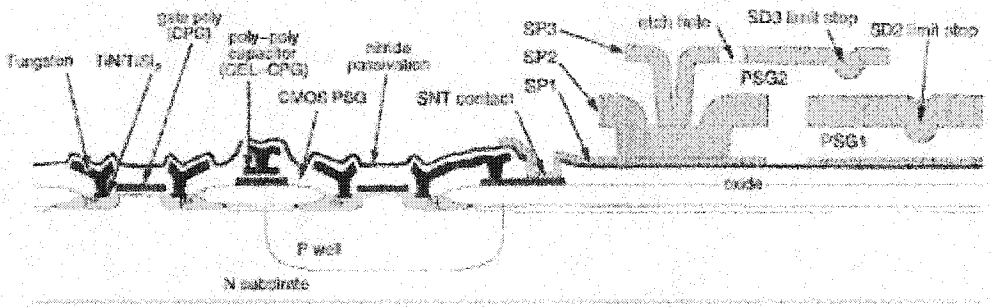


Figure 2.6: Microstructures en polysilicium fabriquées en post-traitement à un procédé CMOS via un micro-usinage de surface [51].

Les structures CMOS MEMS réalisées à l'aide d'un micro-usinage en volume [54-57] utilisent une gravure isotrope ou anisotrope du silicium monocristallin {100}, de l'avant ou de l'arrière du substrat. Ces microstructures peuvent utiliser les différentes couches du procédé

CMOS comme matériaux structurels et la couche de passivation comme masque. Dans le cas d'une gravure arrière du substrat de silicium, la protection de la face avant de l'échantillon peut être assurée par la présence d'un porte-échantillon mécanique ou d'une couche de protection. Ainsi, Parameswaran *et al.* [58] sont les premiers chercheurs canadiens à utiliser un procédé standard CMOS pour fabriquer des microactuateurs MEMS en utilisant un post-traitement compatible CMOS. La figure 2.7 illustre typiquement les plans de masques (layout) et la vue en coupe transversale pour une structure en porte-à-faux et une membrane suspendue. Les microstructures, composées de différentes couches d'oxyde et de polysilicium, sont micro-usinées dans le substrat par gravure anisotrope avec de l'EDP.

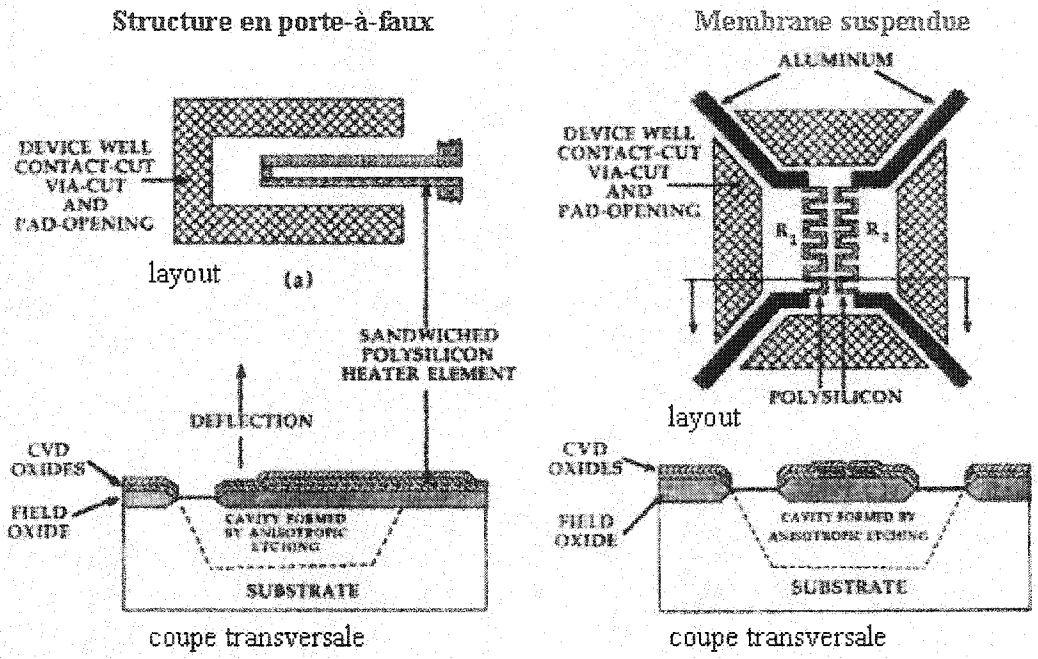


Figure 2.7: Exemples de microstructures fabriquées avec un procédé CMOS suivi d'un micro-usinage en volume: a) plan des masques et b) vue en coupe transversale [58].

À l'opposé des méthodes traditionnelles de micro-usinage en volume utilisant des solutions de gravure, Socher *et al.* [59] utilise une technique de gravure sèche pour libérer des thermocouples. Le microsenseur thermoélectrique IR (pour capter un rayonnement infra-rouge), illustré schématiquement sur la figure 2.8-a, a la forme d'une spirale carrée. Il est composé d'une combinaison de couches diélectriques (blanc), de polysilicium (gris clair) et d'aluminium (gris foncé). La figure 2.8-b illustre le procédé de microfabrication: la première couche de polysilicium et la première couche d'aluminium composent les thermocouples tandis que les

couches diélectriques du procédé standard sont utilisées pour l'isolation. Une gravure RIE SF_6/O_2 permet de graver le silicium sous la structure grâce à des ouvertures dessinées dans tous les niveaux de couches diélectriques. Une dernière couche d'or est déposée sur les senseurs à travers un masque de métal dans le but d'améliorer l'absorption du rayonnement IR. Une micrographie électronique à balayage du senseur thermoélectrique libéré est illustrée sur la figure 2.8-c.

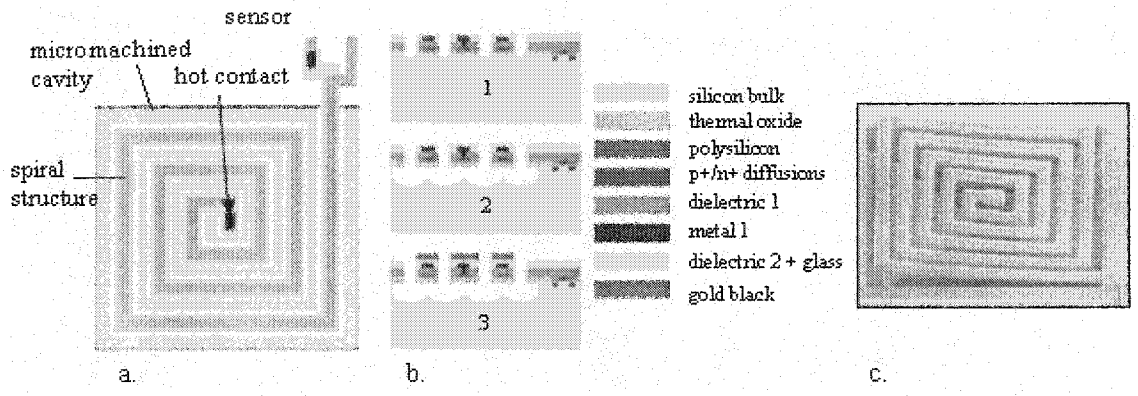


Figure 2.8: Senseurs thermoélectriques IR: a) schéma avec une vue de dessus, b) séquence de fabrication et c) micrographie MEB [59].

Pour toute étape de micro-usinage effectuée après que le procédé standard CMOS ait été complété (post-CMOS), le budget thermique impose une température maximale de 400°C afin de préserver les niveaux de métallisation (en particulier l'aluminium). La fabrication de microsystèmes nécessite l'utilisation d'équipement et de procédés de haute technologie. Le post-traitement CMOS a donc été développé pour permettre à ceux qui n'ont pas accès à un laboratoire de microfabrication, d'utiliser les services de fonderies pour la fabrication des dispositifs et d'effectuer les étapes de micro-usinage additionnelles avec peu d'équipement additionnel.

2.2.3 Les microactuateurs électrothermiques

Les principaux modes d'actuation utilisés pour le fonctionnement des microactuateurs sont de type: électrostatique, magnétostatique, piezoélectrique et électrothermique. Les actuateurs piezoélectriques et thermomécaniques ont l'avantage de produire des forces plus élevées et de permettre des déplacements plus grands [60]. En effet, les actuateurs électrostatiques et magnétostatiques nécessitent l'application de grandes tensions ou l'opération

de ces dispositifs dans des modes de résonances pour permettre de plus grands déplacements. Les matériaux piezoélectriques ne sont pas couramment disponibles dans les procédés de fabrication pour les MEMS. Par contre, le silicium et ses composés, qui ne présentent pas l'effet piézoélectrique, se caractérisent par une grande variété de coefficients d'expansion thermique. Ainsi, la différence d'expansion thermique entre des couches adjacentes peut être utilisée pour activer des microactuateurs de façon électrothermique [61]. La possibilité d'obtenir de grandes déflexions et des forces relativement élevées en utilisant des tensions d'alimentation basses ainsi qu'une simplicité d'implémentation ont contribué à la popularité des microactuateurs activés électro-thermiquement. Par conséquent, ces derniers ont fait l'objet de nombreuses applications: structures bimorphes combinées à une source de chauffage intégrée [62], contrôle de flux en microfluidique [63], systèmes de micro-mouvement avec un déplacement ciliaire [64], capteurs de température à mémoire [65], etc.

Quelques exemples d'actuateurs électrothermiques caractérisés par un mouvement perpendiculaire ou parallèle au plan du substrat, sont présentés ci-dessous. Un microactuateur électrothermique, composé d'une structure en porte-à-faux bimorphe ayant un mouvement hors du plan du substrat, réalisé par Lin *et al.* [66,67] est illustré sur la figure 2.9. Le dispositif est fabriqué par micro-usinage de surface avec des couches minces de polyimide et de métal (Au) utilisé comme électrode ou résistance de chauffage. La structure en porte-à-faux, illustrée sur la figure 2.9-a, est caractérisée par une courbure en forme de "C" pouvant atteindre une hauteur de plusieurs centaines de microns par rapport au substrat. Normalement courbée vers le haut, la poutre se déplie par actuation électrostatique ou thermique. L'actuation électrostatique nécessite une tension supérieure à 200 V afin d'aplatir complètement la structure et l'absence de chauffage évite de détériorer le polyimide. En contrepartie, l'actuation thermique permet un contrôle plus précis du mouvement et utilise une tension maximum de 7 V et un courant de 4 mA pour ouvrir complètement la structure. La figure 2.9-b montre l'opération d'un micro-conteneur, composé d'une multitude d'actuateurs assemblés, conçu pour transporter des objets microscopiques dans un liquide ou dans l'air. Une micrographie MEB du micro-conteneur, ayant l'apparence d'une anémone de mer, est présentée à la figure 2.9-c.

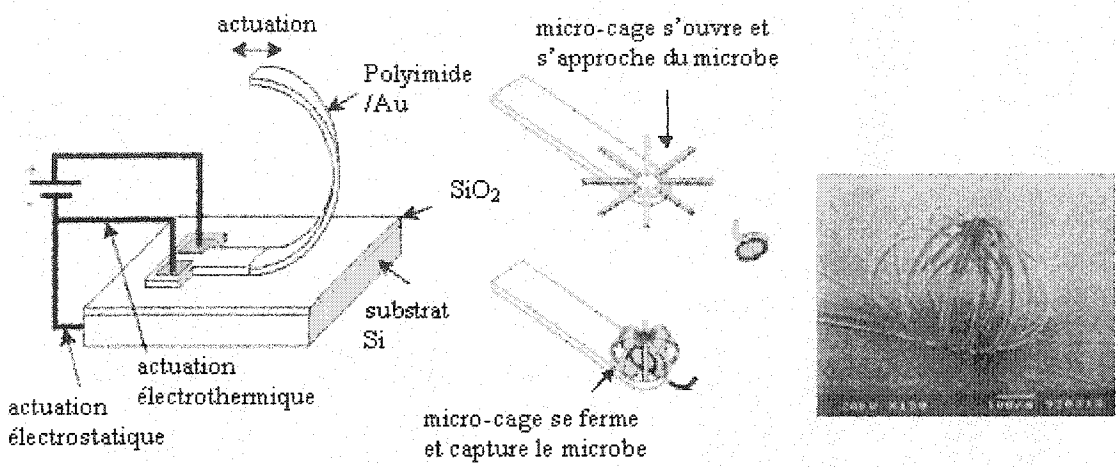


Figure 2.9: Actuateur électrothermique en forme de C: a) vue schématique, b) opération d'un micro-conteneur et c) micrographie MEB [66,67].

Par ailleurs, Kolesar *et al.* [68] ont conçu et développé un actuateur électrothermique pouvant effectuer un déplacement latéral, c'est à dire dans le plan du substrat. Une vue schématique du microactuateur est illustrée à la figure 2.10-a. Le dispositif est basé sur l'activation thermique d'une poutre en polysilicium et utilise un chauffage par effet joule pour générer une expansion thermique et un mouvement. En effet, lorsque le courant circule au travers du microactuateur, une plus grande densité de courant dans le bras "chaud" qui est le plus étroit entraîne un chauffage et une expansion thermique sur sa longueur qui est supérieure à celle du bras "froid" auquel il est joint. Il en résulte une déflexion de l'extrémité de la poutre suivant le profil d'un arc suite à la rotation du bras "froid" au niveau d'un segment de flexion le reliant à son point d'ancrage. Les micrographies optiques de la figure 2.10-b montrent la déflexion du microactuateur asymétrique (avec un bras "froid" d'une longueur de 250 µm) pouvant atteindre 10 µm avec une puissance d'activation de l'ordre de 25 mW. Le déplacement d'une structure en porte-à-faux adjacente, résultant de l'interaction avec l'actuateur électrothermique permet d'estimer la force générée par l'actuateur à 8,1 µN.

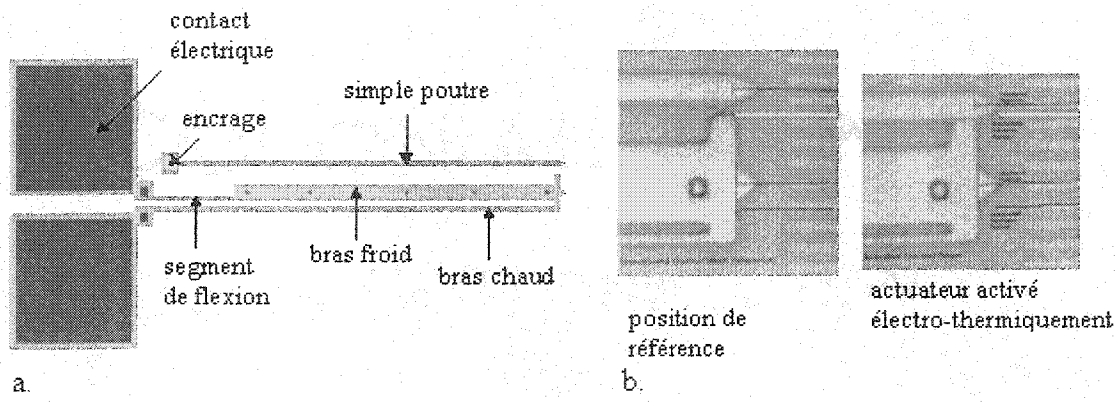


Figure 2.10: Design d'un actuateur électrothermique en polysilicium avec un déplacement latéral dans le plan du substrat [68] .

Sehr *et al.* [69] ont publié un nouveau procédé pour la fabrication d'un dispositif basé sur l'effet bimorphe, mais permettant un déplacement dans le plan du substrat. Contrairement à la configuration plane habituelle, leur structure bimorphe verticale est composée de silicium recouvert d'aluminium sur le côté tel qu'illustré schématiquement à la figure 2.11-a. La séquence de fabrication, illustrée à la figure 2.11-b, emploie un substrat de type SOI (silicon-on-insulator), et consiste en une gravure anisotrope liquide à l'endos, puis une gravure anisotrope plasma à l'avant de l'échantillon, suivie d'une oxydation thermique humide afin d'isoler le silicium et l'aluminium au niveau de la structure. L'aluminium est déposé par évaporation par faisceau d'électrons avec un angle d'incidence de 24° de manière à obtenir une couche plus épaisse sur les parois latérales que sur les surfaces horizontales. Une gravure isotrope liquide permet de retirer l'aluminium sur les surfaces horizontales mais d'en laisser une épaisseur suffisante sur les parois latérales pour créer une structure bimorphe verticale. L'actuateur est complètement libéré du substrat de silicium et de l'oxyde enterré grâce à des procédés de gravure sèches effectuées depuis l'endos. Ainsi, le chauffage produit lors du passage d'un courant dans le silicium en appliquant une tension entre les pads de contact, conduit à un déplacement latéral de 4,5 µm pour une puissance incidente de 3 mW sur une structure de 1000 µm de long. La figure 2.11-c présente une micrographie MEB d'une partie de l'actuateur vertical bimorphe avec une vue de dessus.

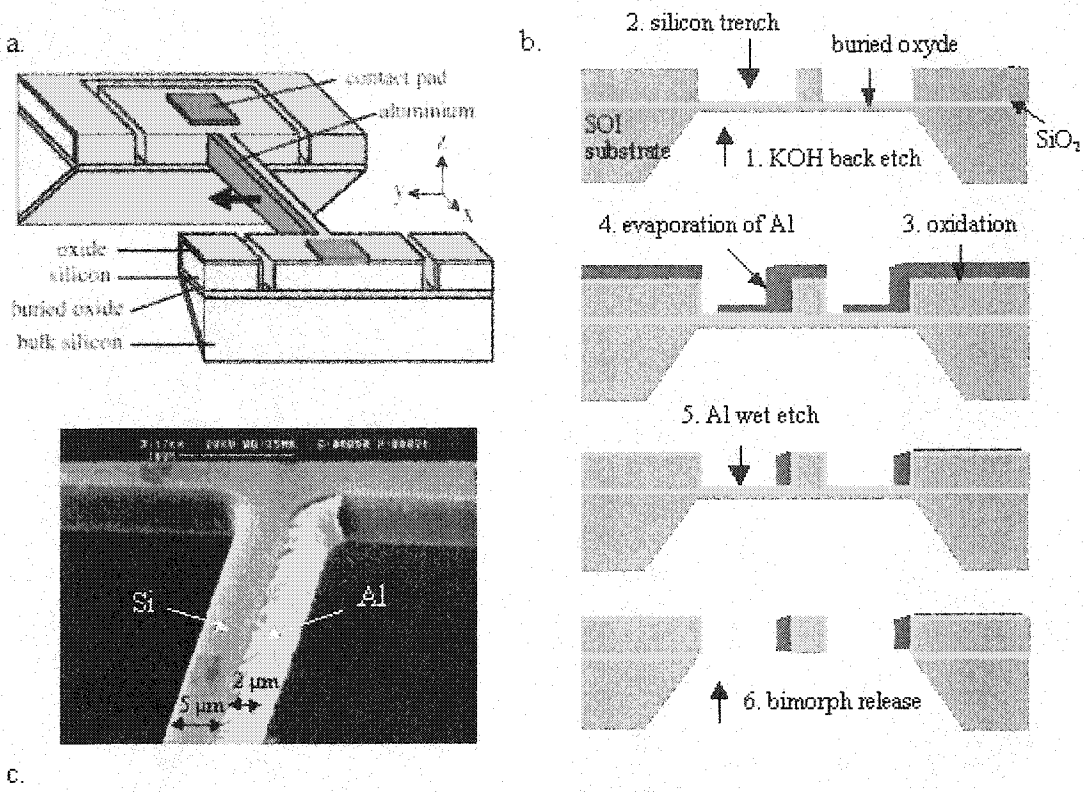


Figure 2.11: Actuateur électrothermique bimorphe vertical: a) vue schématique, b) procédé de microfabrication et c) micrographie MEB d'une partie de l'actuateur [69].

2.3 Principe d'opération et innovation du microactuateur conçu

2.3.1 Principe d'opération du microactuateur

2.3.1.1 Principe de l'effet bimorphe d'une structure bilame

La transduction thermomécanique est l'une des méthodes les plus employées pour mesurer et réguler la température dans les systèmes de thermostats que l'on retrouve dans les maisons ou dans les automobiles. Cette méthode, courante pour les senseurs, peut également être utilisée pour faire fonctionner des microactuateurs [6]. Le principe physique à la base du fonctionnement du nouveau type de microactuateur électrothermique conçu lors de cette thèse

est celui de l'effet bimorphe. La figure 2.12 illustre le chauffage d'une structure thermique bimorphe composée de deux couches de matériaux accolées.

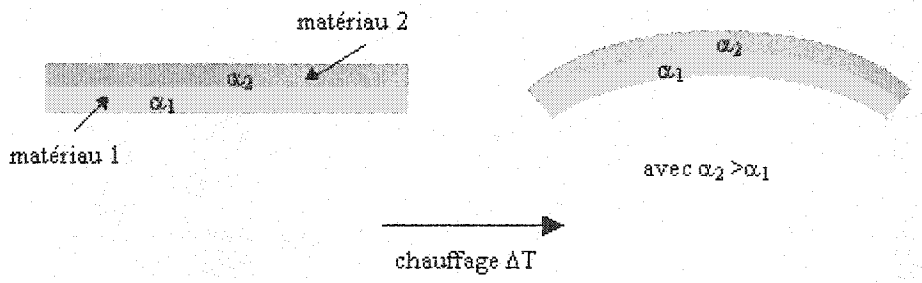


Figure 2.12: Chauffage d'une structure bimorphe de base composée de deux matériaux possédant des coefficients d'expansion thermique très différents.

Chaque matériau est caractérisé par un coefficient d'expansion thermique linéaire α_L qui quantifie le changement dimensionnel relatif ayant lieu pour une variation de température ΔT. Dans le cas d'une structure de longueur initiale L, α_L est le rapport de l'allongement ΔL sur la longueur initiale par unité de température soit:

$$\alpha_L = \frac{\Delta L}{L}\frac{1}{\Delta T} \quad [K^{-1} \text{ ou } °C^{-1}]$$

Les deux matériaux de la structure bimorphe représentée à la figure 2.12 sont caractérisés par des coefficients d'expansion thermiques différents tels que $\alpha_2 > \alpha_1$. Lorsque la structure est chauffée, la couche mince du dessus a tendance à s'étirer davantage que la couche du dessous [70]. Ceci entraîne une courbure de l'ensemble de la structure vers le matériau possédant le plus faible coefficient d'expansion thermique. Ce phénomène est la base du fonctionnement du thermostat bimétal [71] utilisé très tôt pour des applications de contrôle de température (thermostats d'ambiance, fer à repasser, disjoncteurs électriques). Le bilame métallique est composé de deux lames minces et étroites qui sont accolées et composées de métaux ayant des coefficients de dilatation thermique différents. Sous l'effet d'une variation de température, une lame se dilate plus que l'autre, ce qui entraîne une courbure du bilame et en général un contact électrique, interrompant le passage du courant dans un appareil (radiateur, fer à repasser) jusqu'à ce que le bilame refroidisse.

2.3.1.2 Bistabilité du microactuateur: principe d'opération

Le microactuateur conçu pour cette thèse est composé d'une structure en porte-à-faux comprenant deux bicouches A et B, un pad court-circuiteur situé à l'extrémité de la poutre et une butée. Les actuations thermiques indépendantes et contrôlées des deux bilames ont des fonctions spécifiques, et permettent au microactuateur de passer d'une position stable à l'autre. La bistabilité du microactuateur est illustrée à la figure 2.13 montrant les transitions du microactuateur de son état ON à son état OFF et vice-versa.

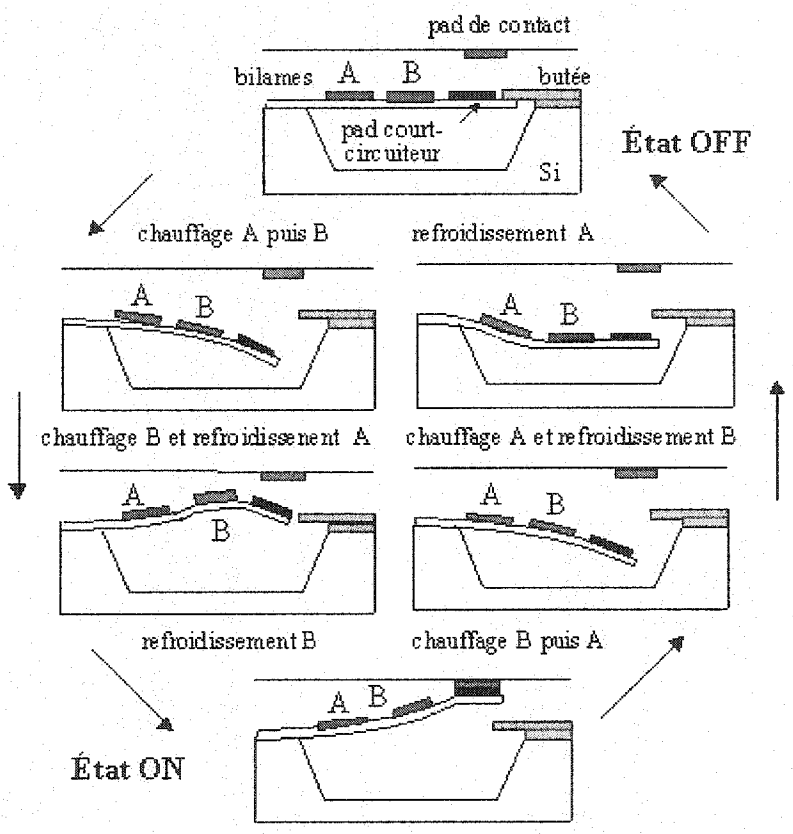


Figure 2.13: Transition du microactuateur entre les états ON et OFF grâce à une séquence de chauffage et de refroidissement spécifique des bilames.

Dans l'état OFF (1), l'extrémité de la poutre reste coincée sous la butée. De cette façon, le pad court-circuiteur est séparé du pad de contact situé au-dessus du microactuateur. Le bilame A, situé près de la partie attachée de la poutre, a pour rôle de faire défléchir verticalement l'ensemble de la structure. Le bilame B, situé proche de l'extrémité libre de la structure, a pour fonction d'assurer un raccourcissement de la poutre de manière à dégager son extrémité de la

butée. Pour le passage de l'état OFF à l'état ON, les bilames A et B suivent une séquence de chauffage et de refroidissement précise: (2) le chauffage simultané des deux bilames pour que l'extrémité de la poutre se dégage de la butée, (3) le refroidissement du bilame A en maintenant le chauffage du bilame B pour que l'ensemble de la structure remonte au-dessus de la surface de l'échantillon sans que l'extrémité de la poutre n'accroche la butée au passage, et (4) le refroidissement des bilames A et B qui consiste à arrêter les sources de chauffage de ces structures. Le fonctionnement de ce microactuateur utilise la relaxation des contraintes internes résiduelles, inhérentes à la fabrication des couches minces composant la structure, pour que celle-ci puisse naturellement défléchir vers le haut.

Dans l'état ON (5), le pad court-circuiteur situé à l'extrémité de la poutre entre en contact avec un pad de contact situé au-dessus de la structure à une distance permettant un bon contact électrique entre ces deux matériaux. Le pad de contact, dessiné sur la figure 2.13, symbolise en réalité la connexion que doit effectuer le pad court-circuiteur pour relier des lignes électriques situées sur un circuit imprimé placé au-dessus du dispositif. Le pad de contact sera placé à une hauteur inférieure à la déflexion naturelle maximale de la poutre de manière à accentuer le frottement et la force exercée par le pad court-circuiteur sur lui et améliorer leur contact électrique. Le passage de l'état ON à l'état OFF du microactuateur s'effectue selon une autre séquence de chauffage et de refroidissement, légèrement différente de la précédente: (6) le chauffage simultané des bilames A et B permet d'abaisser l'ensemble de la structure en porte-à-faux sous le niveau de la surface de l'échantillon sans accrocher la butée avec l'extrémité de la poutre, (7) le refroidissement du bilame B en maintenant le chauffage du bilame A de manière à maintenir l'ensemble de la structure sous la butée mais en réalisant l'extension de la partie de la poutre qui va rester coincée sous la butée, et (8) le refroidissement des bilames A et B pour que le microactuateur remonte mais reste coincé sous la butée. Les séquences de chauffage et de refroidissement des bilames A et B sont ajustables au moyen d'un circuit d'adressage microélectronique (voir annexe B) qui contrôle les signaux d'entrée spécifiques nécessaires au changement d'état du microactuateur.

2.3.2 Innovation du dispositif par rapport aux microactuateurs existants

L'état de l'art en ce qui concerne les micro-commutateurs monostables et bistables, les composants MEMS compatibles CMOS et les microactuateurs électrothermiques, présenté au début de ce chapitre, a permis d'avoir un aperçu de microactuateurs réalisés ou en cours de développement dans ces différents domaines. La conception de notre microactuateur s'est inspirée d'une combinaison des avantages des différentes catégories décrites dans cette revue de littérature. En effet, notre dispositif est destiné à effectuer une commutation entre deux états stables via une actuation électrothermique. Il est innovateur dans son design et sa fabrication, utilisant une technologie standard CMOS suivi d'un post-traitement compatible CMOS qui sera présenté dans le chapitre 3. Les principaux avantages de ce nouveau dispositif, incluant une matrice de microactuateurs bistables avec un système de contrôle intégré, sont:

- son actuation électrothermique basée sur l'effet bimorphe permettant une simplicité de fabrication et la possibilité d'obtenir de grands déplacements et de grandes forces;
- sa capacité d'intégration à grande échelle à cause de ses petites dimensions;
- sa compatibilité avec un procédé de fabrication standard microélectronique permettant sa production en grand volume et à faible coût;
- la possibilité de contrôle direct par un système d'adressage microélectronique intégré sur le même substrat et d'améliorer de cette façon la fiabilité du dispositif en réduisant le nombre d'interconnexions et de composants;
- sa bistabilité permettant au micro-commutateur de rester ouvert ou fermé sans avoir besoin d'une alimentation externe permanente pour maintenir son état.

Ce dispositif IMEMS, intégrant des composants MEMS et CMOS, permet donc d'offrir une solution de système complet sur une puce unique. Il pourrait être utilisé dans tout domaine d'application pouvant bénéficier des avantages d'un micro-commutateur bistable fabriqué de façon monolithique avec son circuit de contrôle et nécessitant seulement une alimentation électrique pour changer d'état.

2.4 Conception et design du microactuateur électrothermique bistable

La diversité des MEMS s'exprime non seulement par la vaste étendue de leurs domaines d'applications mais également dans l'approche multi-disciplinaire requise pour le design et la microfabrication de ces composants. Le design des résistances des bilames A et B, permettant un chauffage par effet joule pour activer le microactuateur, a été conçu à partir de plusieurs considérations électro-thermo-mécaniques en tenant compte des matériaux offerts par le procédé standard CMOS. Une analyse des transferts de chaleur de cet actuateur thermique est présentée à la fin de cette section.

2.4.1 Modélisation thermomécanique d'une structure bimorphe

Une structure bimorphe est composée de deux matériaux ayant des coefficients d'expansion thermique différents. La figure 2.14 représente schématiquement une structure en porte-à-faux bimorphe composée de deux couches minces repérées par les indices 1 et 2. Chaque couche mince est caractérisée par son épaisseur t, sa largeur b, son module d'Young E et son coefficient d'expansion thermique α. Les hypothèses à la base de cette modélisation analytique simplifiée de la structure bimorphe sont les suivantes:

- le coefficient d'expansion thermique α_2 de la couche mince 2, située au dessus de la structure, est supérieur au coefficient d'expansion thermique α_1 de la couche mince 1 se trouvant au niveau inférieur et la différence entre les coefficients d'expansion thermique reste constante pendant le chauffage;
- la distribution en température est uniforme à l'intérieur de la structure et due généralement à la présence d'une résistance de chauffage couvrant toute la longueur de la poutre.

Lorsque la température augmente, la couche mince 2 a tendance à s'étirer davantage que la couche 1, d'où une courbure de l'ensemble de la structure vers le matériau possédant un plus faible coefficient d'expansion thermique.

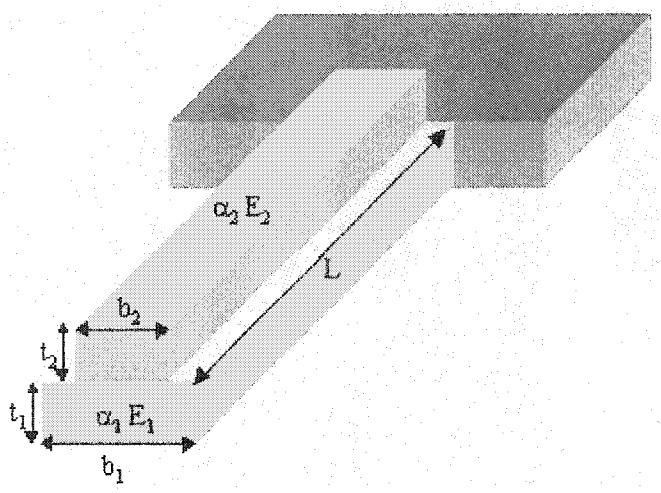


Figure 2.14: Vue schématique d'une structure en porte-à-faux bimorphe composée de deux matériaux en couches minces identifiés par les indices 1 et 2.

Un segment pris sur la longueur de la poutre courbée à cause de l'augmentation de température est représenté sur la figure 2.15 avec les forces et les moments agissant sur ses sections transversales [71,72]. Toutes les forces agissant sur les sections transversales des matériaux du segment de la structure bimorphe considéré, peuvent être représentées par:

- une force de tension axiale P_1 et un moment M_1 pour le matériau 1
- une force de compression axiale P_2 et un moment M_2 pour le matériau 2.

À l'équilibre, la somme des forces internes agissant sur toutes les sections transversales doit être nulle:

$$\sum \vec{F}_{int} = 0$$

soit $$P_1 = P_2 = P \qquad (2.1)$$

Dans la position d'équilibre, la somme des moments doit également être nulle. Par conséquent, la somme des moments des forces internes transversales P_1 et P_2 agissant au point A situé au milieu de la section transversale de la couche mince 2 (voir figure 2.15) est telle que:

$$\sum \vec{M} = 0$$

soit $$P_1\left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) = M_1 + M_2 \qquad (2.2)$$

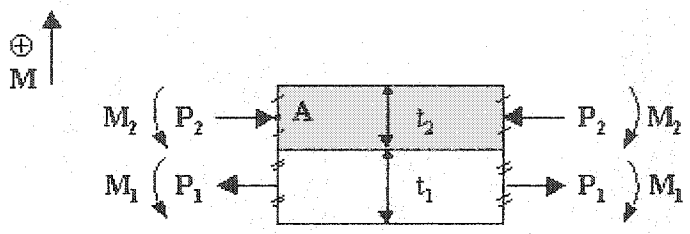


Figure 2.15: Diagramme des forces et des moments internes agissant sur les sections transversales d'un segment pris sur la longueur de la structure bimorphe.

Selon la théorie des poutres, les moments internes M s'expriment en fonction des modules d'Young E, des moments d'inertie I et du rayon de courbure r suivant les relations [73]:

$$M_1 = \frac{E_1 I_1}{r} \qquad M_2 = \frac{E_2 I_2}{r} \tag{2.3}.$$

La combinaison des équations 2.2 et 2.3 conduit à l'équation suivante:

$$P\left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) = \frac{E_1 I_1}{r} + \frac{E_2 I_2}{r} \tag{2.4}$$

Par ailleurs, pour un changement de température ΔT, la déformation à l'interface entre les deux matériaux doit être la même; dans ce cas:

$$\alpha_1 \Delta T + \frac{P}{E_1 t_1 b_1} + \frac{t_1}{2r} = \alpha_2 \Delta T - \frac{P}{E_2 t_2 b_2} - \frac{t_2}{2r} \tag{2.5}$$

La courbure est définie comme étant l'inverse du rayon de courbure:

$$k = \frac{1}{r} \tag{2.6}$$

En combinant les équations 2.5 et 2.6, on obtient une expression de la courbure en fonction des paramètres des couches minces:

$$k = \frac{(t_1 + t_2)(\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T}{\frac{(t_1 + t_2)^2}{2} + 2(E_1 I_1 + E_2 I_2)\left(\frac{1}{E_2 b_2 t_2} + \frac{1}{E_1 b_1 t_1}\right)} \tag{2.7}$$

À partir de sa définition, le moment d'inertie peut s'exprimer en fonction des dimensions de la couche mince d'indice i:

$$I_i = \int_A y^2 \cdot dA = \frac{b_i t_i^3}{12} \tag{2.8}$$

En substituant 2.8 dans 2.7 on obtient donc:

$$k = \frac{(t_1 + t_2)(\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T}{\frac{(t_1 + t_2)^2}{2} + \frac{1}{6}\left(E_1 b_1 t_1^3 + E_2 b_2 t_2^3\right)\cdot\left(\frac{E_1 b_1 t_1 + E_2 b_2 t_2}{E_1 E_2 b_1 b_2 t_1 t_2}\right)} \tag{2.9}$$

L'équation 2.9 est similaire à l'expression de la courbure calculée par Timoshenko dans l'analyse d'un thermostat bimétal [71]. De même, Chu *et al.* [72] obtiennent une expression identique sous la forme suivante:

$$k = \frac{6 b_1 b_2 E_1 E_2 t_1 t_2 (t_1 + t_2)(\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T}{\left(b_1 E_1 t_1^2\right)^2 + \left(b_2 E_2 t_2^2\right)^2 + 2 b_1 b_2 E_1 E_2 t_1 t_2 \left(2t_1^2 + 3t_1 t_2 + 2t_1^2\right)} \tag{2.10}$$

Avec la notation $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$, le rayon de courbure se déduit donc de l'équation 2.9:

$$r = \frac{1}{6}\frac{4(t_1 + t_2)^2 - 2t_1 t_2 + \left(\frac{E_1 b_1 t_1^3}{E_2 b_2 t_2}\right) + \left(\frac{E_2 b_2 t_2^3}{E_1 b_1 t_1}\right)}{\Delta\alpha\Delta T(t_1 + t_2)} \tag{2.11}$$

En faisant les approximations d'un équilibre statique et d'une continuité de la contrainte à l'interface entre les matériaux, Riethmüller *et al.* [74] obtiennent un rayon de courbure différent:

$$r = \frac{2}{3}\frac{\frac{7}{4}(t_1 + t_2)^2 - 2t_1 t_2 + \left(\frac{E_1 b_1 t_1^3}{E_2 b_2 t_2}\right) + \left(\frac{E_2 b_2 t_2^3}{E_1 b_1 t_1}\right)}{\Delta\alpha\Delta T(t_1 + t_2)} \tag{2.12}$$

Cependant, Chu *et al.* [72] vérifient leur modèle analytique à l'aide d'une analyse par élément finis et de résultats expérimentaux déjà publiés et montrent que leur expression 2.10 est la forme correcte par rapport à celle publiée par Riethmüller *et al.* [74].

Du fait que les matériaux de la structure bimorphe ont des coefficients d'expansion thermiques différents, lorsque la température augmente, un moment de courbure entraîne la déflexion de la structure en porte-à-faux. La force générée par le chauffage thermique de la structure bimorphe est distribuée linéairement sur toute la longueur de la structure. Une distribution de force extérieure doit donc être appliquée sur la poutre afin de maintenir l'extrémité de la poutre à sa position fixe initiale. Cependant, on peut supposer qu'une force équivalente F_{eq} est appliquée à l'extrémité de la poutre afin de compenser la courbure générée par l'effet bimorphe. Selon la théorie des poutres [72,75], la déflexion d d'une structure en porte-à-faux est reliée à la force F appliquée à son extrémité et à son module de rigidité EI suivant l'équation:

$$F_{eq} = \frac{3EId}{L^3} \tag{2.13}$$

La déflexion d à l'extrémité de la poutre est également reliée au rayon de courbure suivant l'équation:

$$d = \frac{L^2}{2r} \tag{2.14}$$

La combinaison des équations 2.11 et 2.14 permet d'obtenir une expression de la déflexion de la structure bimorphe en fonction de la variation de température ΔT et des caractéristiques des couches minces employées:

$$d = \frac{3L^2 \Delta\alpha \Delta T(t_1 + t_2)}{4(t_1 + t_2)^2 - 2t_1 t_2 + \left(\frac{E_1 b_1 t_1^3}{E_2 b_2 t_2}\right) + \left(\frac{E_2 b_2 t_2^3}{E_1 b_1 t_1}\right)} \tag{2.15}$$

Cette équation montre qu'une grande déflexion de la structure bimorphe, permettant de générer une grande force à son extrémité suivant la relation 2.13, est obtenue pour une grande différence entre les coefficients d'expansion thermique des matériaux, une longueur de poutre maximale et des épaisseurs de couches minces minimales.

2.4.2 Design des résistances de chauffage pour les bilames A et B

La modélisation analytique simple de la structure bimorphe, présentée précédemment est à la base de la conception du microactuateur. Cette section explique le design des résistances de chauffage des bilames A et B du design ICBPMAT5 suivant des considérations électrothermiques puis thermomécaniques.

2.4.2.1 Considérations électrothermiques

La conception du microactuateur vise à utiliser les couches minces d'un procédé standard CMOS (qui sera décrit plus en détail au chapitre 3) afin de fabriquer la partie microélectronique du dispositif sur le même substrat. Le tableau 2.1 présente les caractéristiques des matériaux disponibles via ce procédé et utilisés pour la fabrication d'un microactuateur basé sur l'effet bimorphe. Selon ce tableau, une grande différence entre les coefficients d'expansion thermique

est obtenue pour un bilame composée d'Al et de SiO_2. Ces matériaux ont donc été choisis pour constituer les bilames A et B.

Tableau 2.1: Propriétés physiques des matériaux utilisés dans la fabrication de microactuateurs utilisant l'effet d'expansion thermique [5,74].

matériau	coefficient d'expansion thermique α [10^{-6}/K]	module d'Young E [10^{11}N/m^2]	conductivité thermique k [W/m·K]	densité de masse ρ_m [10^3 kg/m^3]	chaleur spécifique C_p [10^3J/kg·K]
Si	2,6	1,62	170	2,42	0,691
SiO_2	0,4	0,74	1,4	2,66	1
Si_3N_4	2,8	1,55	18,5	3,44	0,7
Al	23	0,69	235	2,692	0,9

La figure 2.16 présente une vue de dessus du microactuateur (design ICBPMAT5) obtenue avec le logiciel AutoCAD 14. Le microactuateur se compose de quatre sections: la partie 1 contenant les lignes conductrices d'entrée et de sortie de chaque bilame; les parties 2 et 3 correspondant respectivement aux résistances de chauffage des bilames A et B; et la partie 4 comprenant le pad court-circuiteur.

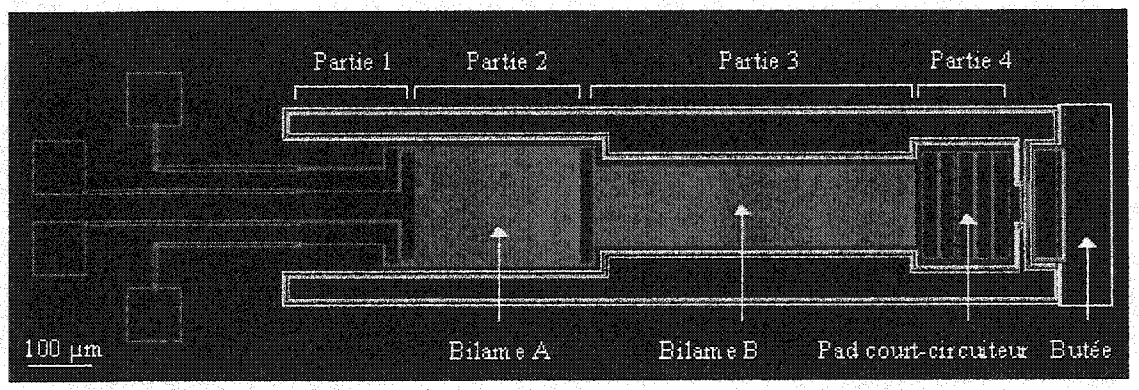


Figure 2.16: Plan de masques du microactuateur du design ICBPMAT5 obtenu à l'aide du logiciel AutoCAD14.

Le microactuateur est activé électro-thermiquement en convertissant par effet joule la puissance électrique introduite dans les résistances de chauffage A et B en puissance thermique. La chaleur générée permet d'augmenter la température des bilames conduisant à leur courbure selon l'effet bimorphe. Afin de maintenir cette température, l'application d'une puissance électrique en

continu est nécessaire pour compenser la perte d'énergie thermique dans l'environnement due aux transferts de chaleur vers le substrat et l'atmosphère gazeuse environnant [74]. Il est donc préférable de réduire l'aire de l'élément transducteur pour minimiser la puissance électrique consommée. Les dimensions des différentes parties du microactuateurs ont donc été choisies de manière à optimiser le dispositif en réduisant au minimum ses dimensions et sa consommation en puissance.

Le tableau 2.1 montre que l'oxyde de silicium est caractérisé par une conduction thermique faible par rapport à l'aluminium. Dans le but de simplifier l'analyse, on fait l'hypothèse que la structure est activée sous vide et que le diélectrique ne conduit pas la chaleur de façon significative dans la structure en porte-à-faux et que c'est la conduction thermique dans la couche métallique qui domine [21]. Une analyse rigoureuse des transferts de chaleur du microactuateur dans l'air ambiant sera réalisée à la section 2.4.3. Selon le tableau 2.1, la couche mince d'aluminium, utilisée pour les résistances de chauffage des bilames A et B a pour résistivité thermique:

$$\rho_{th\,Al} = \frac{1}{k_{th\,Al}} = 4{,}25 \cdot 10^{-3} \ \text{m·K/W}$$

La résistance thermique des lignes d'aluminium sur la partie 1 du microactuateur, de longueur L_1 = 200 µm et de section transversale totale S_1 est donc donnée par:

$$R_{th1} = \rho_{th\,Al} \frac{L_1}{S_1} = 8{,}51 \cdot 10^{4} \ \text{K/W} \tag{2.16}$$

Les spécifications électriques du procédé utilisé concernent le courant maximum par largeur de ligne (permettant d'éviter les problèmes d'électromigration dans l'aluminium) défini par:

$$I = \left(\frac{1\text{mA}}{\mu\,\text{m}}\right) \cdot y \ \ [\text{mA}] \tag{2.17}$$

et la résistance par carré de la couche mince d'aluminium:

$$R_{\square} = 38 \cdot 10^{-3} \ \ \Omega/\square$$

Ainsi pour une ligne en aluminium contenant un nombre de carrés noté $N_{\square}$, sa résistance électrique est de:

$$R_{Al} = R_{\square} \cdot N_{\square} \ \ [\Omega] \tag{2.18}$$

Et la puissance électrique dissipée par effet joule dans cette ligne est de:

$$P_{Al} = R_{Al} \cdot I^2 \ \ [\text{W}] \tag{2.19}$$

Les résistances de chauffage des bilames A et B ont la forme de serpentins tel qu'illustré sur la figure 2.17 afin d'augmenter leur efficacité thermique en maximisant la température atteinte durant le chauffage tout en limitant la consommation d'énergie [21].

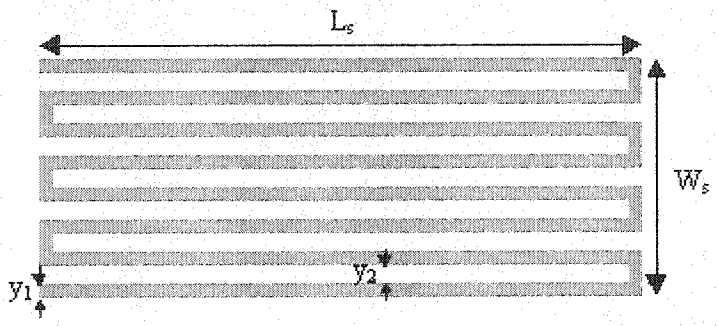


Figure 2.17: Résistance de chauffage composée d'une ligne en aluminium dessinée en serpentin

Selon les notations de la figure 2.17, le nombre de carrés contenu dans ce serpentin est déterminé à partir du nombre de ligne et du nombre de carrés par ligne:

$$N_s = N_{lignes} \cdot N_{\square/ligne} \tag{2.20}$$

où $N_{lignes} \cong \frac{W_s}{y_1 + y_2}$ et $N_{\square/ligne} = \frac{L_s}{y_1}$

La résistance électrique du serpentin est donc donnée par:

$$R_s = R_\square \cdot N_s \quad [\Omega] \tag{2.21}$$

En introduisant le courant maximum autorisé dans le serpentin, la puissance thermique maximale générée est telle que:

$$P_s \cong R_\square \cdot L_s \cdot W_s \cdot \frac{y_1}{y_1 + y_2} \cdot \left(\frac{1mA}{\mu m}\right)^2 \quad [W] \tag{2.22}$$

En notant $A_s = L_s \cdot W_s$ la surface occupée par la résistance de chauffage et en considérant la valeur maximale de $y_1/(y_1+y_2) = 1$, on obtient:

$$P_s = R_\square \cdot A_s \cdot \left(\frac{1mA}{\mu m}\right)^2 \tag{2.23}$$

La puissance thermique évacuée par la partie 1 du microactuateur correspond à celle utilisée par les lignes conductrices en Al.

$$P_{th1} = \frac{\Delta T}{R_{th1}} \quad [W] \tag{2.24}$$

En égalisant la puissance thermique utilisée par la partie 1 avec la puissance électrique dissipée par le serpentin, on obtient l'expression suivante de la surface A_s du bilame:

$$A_s = \frac{\Delta T}{R_{\square} R_{th1}} \cdot \left(\frac{1\mu m}{mA} \right)^2 \quad [\mu m^2]$$

$$\Rightarrow \qquad A_s = \frac{\Delta T}{R_{\square} R_{th1}} \cdot 10^6 \quad \mu m^2 \tag{2.25}$$

À partir de cette équation, nous avons déterminé les aires des bilames A et B en fonction de l'augmentation de température nécessaire à leur actuation (voir section suivante pour les dimensions des bilames A et B en fonction des températures nécessaires à leur actuation).

2.4.2.2 Considérations thermomécaniques

Les bilames A et B du microactuateur du design ICBPMAT5 sont chacun composés de bicouches: aluminium sur oxyde (Al/SiO_2). La couche métallique en aluminium, située sur la partie supérieure du bilame, est configurée selon un serpentin, de manière à constituer la résistance de chauffage permettant d'augmenter la température de l'ensemble de la structure. Les caractéristiques physiques des matériaux utilisés dans cette section sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau 2.2: Caractéristiques physiques des couches minces SiO_2 et Al pour les calculs de déflexion des bilames A et B.

Matériau i	1: SiO_2	2: Al
E_i - module d'Young	$0{,}74 \cdot 10^{11}$ N/m^2	$0{,}69 \cdot 10^{11}$ N/m^2
b_i - largeur de la couche	2 µm	1 µm
t_i - épaisseur de la couche	2,4 µm	1 µm
α_i - coefficient d'expansion thermique	$0{,}4 \cdot 10^{-6}$ /°C	$23 \cdot 10^{-6}$ /°C

L'expression de la déflexion de l'extrémité de la poutre selon l'équation 2.15 montre que seul le rapport des largeurs des couches minces intervient. Nous avons donc utilisé des largeurs effectives tenant compte seulement du fait que la largeur effective de la couche d'Al est deux fois plus petite que celle de l'oxyde.

Le bilame A, situé sur la partie 2 du microactuateur, a pour rôle de défléchir verticalement la structure de manière à ce que l'extrémité de la poutre puisse passer en dessous du niveau de la butée. Lorsque le chauffage du bilame A est arrêté, son refroidissement permet à la structure de retrouver sa position initiale avec une déflexion naturelle vers le haut si l'extrémité de la poutre s'est dégagée de la butée grâce au bilame B. Dans le cas où l'extrémité de la poutre reste coincée sous la butée, l'ensemble de la structure est maintenu sous le niveau de la butée correspondant à l'état OFF du dispositif (voir figure 2.13). La déflexion, due au chauffage du bilame A, doit cependant être supérieure à la déflexion naturelle pour que la poutre puisse passer sous la butée. Le bilame A se compose principalement d'une combinaison de couches d'oxydes sur sa partie inférieure et de la seconde couche métallique en aluminium du procédé standard CMOS sur sa partie supérieure (voir chapitre 3 pour la composition exacte). La déflexion verticale du bilame A peut être déterminée à partir des propriétés physiques des matériaux utilisés et de ses dimensions. Le design du bilame A a été conçu pour obtenir une augmentation de température $\Delta T = 120°C$ correspondant, selon l'équation 2.24, à une puissance thermique utilisée par la partie 1 de $P_{th1} = 1{,}41$ mW. La longueur de la résistance de chauffage du bilame A a été choisie de $L_A = 230$ µm pour obtenir un rayon de courbure $r_A = 1288{,}5$ µm et une déflexion théorique $d_A = 20{,}5$ µm selon les équations 2.11 et 2.15. À partir de l'aire du bilame A, calculée au moyen de l'équation 2.25, la largeur du bilame A est de $W_A = 161$ µm. La figure 2.18 illustre la déflexion du bilame A obtenu au moyen d'une simulation thermomécanique de la structure à l'aide du logiciel d'analyse par éléments finis Ansys/Multiphysics. Cette simulation par éléments finis a été réalisée sur un modèle simplifié du bilame A c'est à dire une structure en porte-à-faux à deux couches. Lorsque la température de la structure augmente de $\Delta T = 120°C$, la déflexion maximale obtenue par simulation Ansys à l'extrémité de la poutre est de -20,5 µm. Ce résultat correspond à celui obtenu avec l'équation 2.15 présentée dans la modélisation analytique simplifiée d'une structure bimorphe.

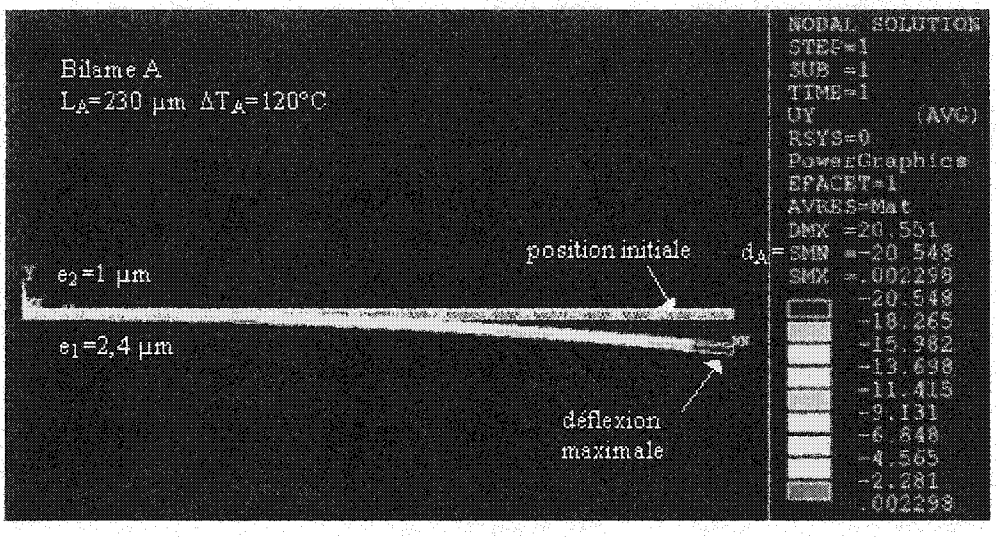


Figure 2.18: Déflexion thermomécanique du bilame A obtenue avec une simulation par éléments finis du comportement thermomécanique.

Le bilame B, situé sur la partie 3 du microactuateur a pour rôle de raccourcir la longueur de la poutre dans le plan du substrat. Cette distance de raccourcissement doit être supérieure à la distance de chevauchement de la butée sur l'extrémité de la structure en porte-à-faux pour permettre son dégagement. Le calcul de cette distance de raccourcissement résultant de l'actuation du bilame B, utilise les notations de la figure 2.19.

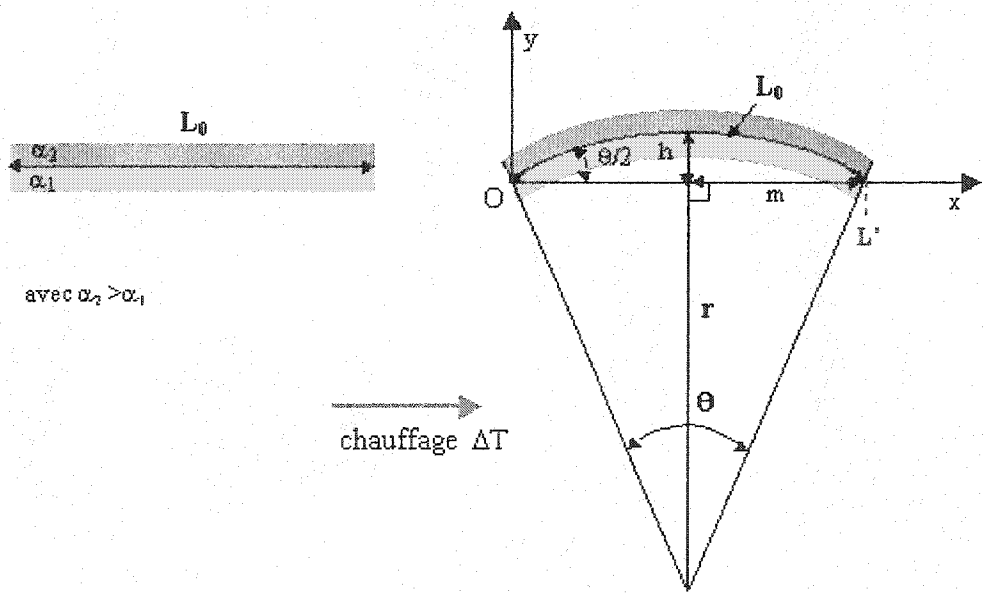


Figure 2.19: Raccourcissement de la structure bilame sous l'effet de l'augmentation de température.

La structure à deux couches représentée sur la figure 2.19 a une longueur initiale au repos L_0. Lorsque sa température augmente de ΔT, le bilame se courbe vers la matériau de plus faible coefficient d'expansion thermique avec un rayon de courbure noté r. Dans le cas de cette structure bilame, on suppose que l'axe neutre se situe à l'interface entre les deux matériaux. De ce fait, la longueur de la fibre longitudinale située à l'interface correspond à la longueur initiale L_0 par définition. La géométrie du système permet d'établir une relation trigonométrique entre m la demi-longueur de la projection de l'axe neutre de la poutre par rapport à l'axe (O,x), θ l'angle ayant pour longueur d'arc celle de l'axe neutre de la poutre

$$m = r\sin\frac{\theta}{2} = \frac{L'}{2} \tag{2.26}$$

où L' correspond à la projection de la longueur de l'axe neutre sur l'axe (O,x). Pour θ petit, un développement limité du sinus donne:

$$L' = r\left(\theta - \frac{\theta^3}{24}\right) = L_0 - \frac{L_0^{\,3}}{24r^2}$$

Le raccourcissement $\Delta L'$ du bilame de la figure 2.19 selon l'axe (O,x) est donc tel que:

$$\Delta L = L_0 - L' = \frac{L_0^{\,3}}{24r^2} \tag{2.27}$$

La portion de la butée qui chevauche l'extrémité de la poutre doit avoir une longueur inférieure à ΔL_B pour permettre le dégagement de la poutre. Le design du bilame B permet une augmentation en température ΔT_B = 160°C correspondant selon l'équation 2.24 à une puissance thermique utilisée par la partie 1 de P_{th1} = 1,88 mW. La longueur de la résistance de chauffage du bilame a été choisie de L_B = 448 µm afin d'obtenir respectivement un rayon de courbure r_B = 966,4 µm et un raccourcissement ΔL_B = 4 µm selon les équations 2.11 et 2.27. À partir de l'aire du bilame B, calculée au moyen de l'équation 2.25, la largeur du bilame B est de W_B = 111 µm. D'après l'équation 2.15, une augmentation de température dans le bilame B de ΔT_B = 160°C produit une déflexion verticale de d_B = 103,8 µm à son extrémité, ce qui est vérifiée à l'aide de la simulation par éléments finis de la figure 2.20.

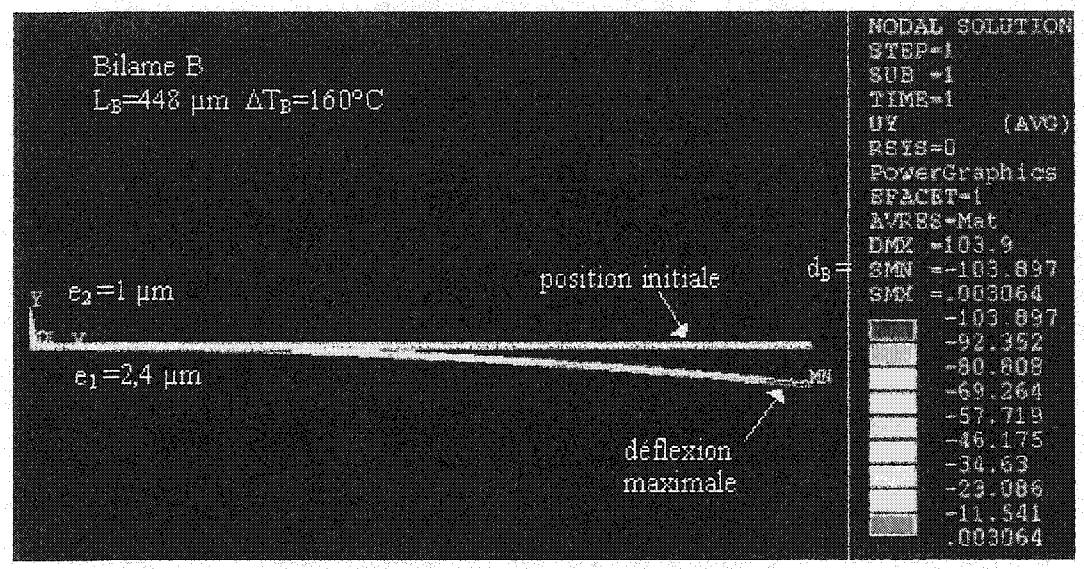


Figure 2.20: Déflexion thermomécanique du bilame B obtenue avec une simulation par éléments finis (Ansys).

Rappelons que la structure en porte-à-faux est caractérisée par une déflexion naturelle initiale résultant de la relaxation des contraintes résiduelles inhérentes au procédé de fabrication. Or, pour la conception de ce microactuateur, aucune information concernant les propriétés mécaniques des couches déposées dans le procédé standard CMOS utilisé n'est disponible. De plus, la confidentialité sur le procédé de fabrication commercial ne permet pas de connaître la nature et les épaisseurs exactes des couches minces ainsi que leurs méthodes et leurs conditions de dépôt. Il est donc difficile d'estimer les valeurs des contraintes internes dans les couches minces utilisées dans la fabrication du microactuateur et donc de prédire la déflexion initiale qui en résulte. Par conséquent, l'étude des contraintes résiduelles dans les couches minces déposées a été réalisée après que les structures MEMS soient libérées. Une modélisation du profil de déflexion du microactuateur en fonction du chauffage séquentiel des bilames A et B (chauffés séparément et simultanément) et en tenant compte des contraintes résiduelles sera présentée au chapitre 5.

2.4.3 Analyse des transferts de chaleur pour une structure bimorphe

Cette section a pour objectif d'étudier les différents types de transfert de chaleur ayant lieu lorsqu'un bilame du microactuateur est chauffée par effet Joule.

Rappelons que la chaleur stockée ΔQ dans un système de masse m est responsable d'une élévation de température ΔT selon la relation:

$$\Delta Q = mC_p\Delta T \quad [J] \tag{2.28}$$

où C_p est la chaleur spécifique (propriété physique du matériau mesurée expérimentalement). Un transfert de chaleur est mesuré par un flux Φ (de même dimension qu'une puissance par exemple électrique) qui correspond à un débit de chaleur tel que:

$$\Phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad [W] \tag{2.29}$$

Le flux de chaleur engendré est proportionnel à la différence de température et à la section S tel que:

$$\Phi = hS(T_1 - T_2) \quad [W] \tag{2.30}$$

où h est le coefficient d'échange de chaleur. Par convention, le flux a une valeur positive lorsqu'il va de T_1 vers T_2 avec $T_1 > T_2$. Par conséquent, la densité de flux est définie par:

$$\Phi' = \frac{\Phi}{S} = h(T_1 - T_2) \quad [W/m^2] \tag{2.31}$$

Pour un matériau caractérisé par une conductivité thermique k, une masse volumique ρ et une chaleur spécifique par unité de volume C_p, siège d'un dégagement ou d'une absorption de chaleur de puissance thermique Φ'' par unité de volume et de temps, l'équation générale de diffusion de la chaleur décrit la conservation de l'énergie [76,77].

$$k\nabla^2 T + \Phi'' = \rho C_p \frac{dT}{dt} \tag{2.32}$$

où ρC_p, la capacité de chaleur volumétrique, mesure la capacité du matériau à stocker de l'énergie thermique. La résolution de cette équation, permet d'obtenir l'évolution de la température en tout point en fonction du temps si on connaît l'état initial et les conditions aux limites.

La structure bilame, chauffée par effet Joule, est le siège de différents types de transfert de chaleur (par conduction, par convection et par radiation) tel qu'illustré sur la figure 2.21. Il est nécessaire d'évaluer l'ordre de grandeur de ces différents modes de transfert afin de déterminer l'augmentation de température atteinte par le structure en fonction de la puissance électrique dissipée.

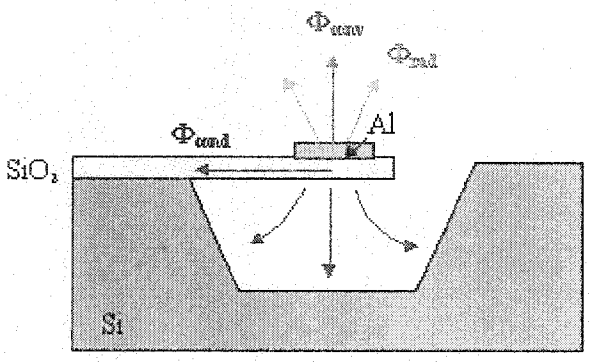


Figure 2.21: Différents modes de transfert de chaleur pour une structure bilame.

2.4.3.1 La conduction thermique

Lorsqu'un gradient de température existe dans un milieu stationnaire (solide, liquide ou gazeux) la conduction fait référence au transfert de chaleur ayant lieu à travers le milieu. Selon la loi de Fourier, le vecteur quantité de chaleur par unité de surface et de temps est défini, en coordonnées cartésiennes, par:

$$\Phi' = -k\nabla T = -k\left(\frac{dT}{dx}\mathbf{i} + \frac{dT}{dy}\mathbf{j} + \frac{dT}{dz}\mathbf{k}\right) \quad [W/m^2] \tag{2.33}$$

L'équation 2.33 appliquée à une tranche d'épaisseur dx, d'une plaque de surface S caractérisée par une conductivité thermique k et une distribution de température T(x), donne:

$$\Phi'_x = -k\frac{dT}{dx} \quad [W/m^2] \tag{2.34}$$

Le flux de chaleur Φ'_x est le taux de transfert de chaleur dans la direction x par unité de surface et de temps, perpendiculaire à la direction du transfert et proportionnel au gradient de température dT/dx dans cette direction [78]. Le signe moins est dû au fait que la chaleur est transférée dans la direction de la température décroissante. En régime stationnaire, la distribution en température est linéaire entre deux points de température T_1 et T_2, séparés par une distance L, tel qu'illustré sur la figure 2.22.

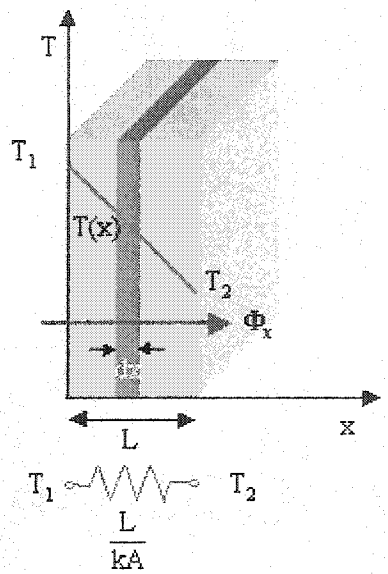


Figure 2.22: Transfert de chaleur par conduction thermique au travers d'une plaque de surface A.

Le flux de chaleur par conduction au travers d'une plaque de surface S, par unité de temps, est:

$$\Phi_x = \frac{k}{L} S(T_1 - T_2) \quad [W] \tag{2.35}$$

Donc la densité de flux de chaleur par unité de temps est telle que:

$$\Phi'_x = \frac{k}{L}(T_1 - T_2) \quad [W/m^2] \tag{2.36}$$

Les équations 2.35 et 2.36 montrent que le flux de chaleur Φ_x et la densité de flux de chaleur Φ'_x sont indépendants de x.

Notons que la résistance thermique est reliée à la conduction de chaleur dans une plaque par:

$$R_{th,cond} = \frac{T_1 - T_2}{\Phi_x} = \frac{L}{kA} \quad [K/W] \tag{2.37}$$

Il existe donc une analogie avec la résistance électrique qui est associée à la conduction de l'électricité suivant la loi d'Ohm:

$$R_e = \frac{V_1 - V_2}{I} = \frac{L}{\sigma_e A} \quad [\Omega] \tag{2.38}$$

où σ_e est la conductivité électrique. La similitude des équations 2.37 et 2.38 suggère que le courant électrique corresponde à un flux thermique et que la tension électrique soit équivalente à

une différence de température pour la conduction thermique. Il est à noter que la température atteinte est toujours définie par rapport à une référence comme la tension son équivalent électrique [21]. De cette façon, la conductance thermique est définie comme l'inverse de la résistance thermique:

$$G_{th,cond} = \frac{1}{R_{th,cond}} = \frac{\Phi_x}{T_1 - T_2} = \frac{kA}{L} \quad [W/K] \tag{2.39}$$

où A est la surface de la plaque de largeur W et d'épaisseur e. Il devient intéressant d'utiliser les circuits thermiques équivalents pour des systèmes plus complexes tels que les plaques multicouches qui peuvent comporter plusieurs résistances thermiques en série ou en parallèle. Ainsi, dans le cas d'une structure multicouche, la conductance totale du système est obtenue de la même façon que son équivalent en électricité, en additionnant les conductances des différentes couches i en parallèle telle que:

$$G_{cond,total} = \sum_i G_{th,i} = \sum_i \frac{k_i A_i}{L_i} = \sum_i \frac{k_i W_i e_i}{L_i} \tag{2.40}$$

Effectuons l'analyse thermique pour la structure illustrée sur la figure 2.21. La puissance électrique P_e est dissipée dans la résistance de chauffage afin d'augmenter la température de la structure de ΔT par rapport à la température du substrat T_0 = 20°C (considérée à la même température que l'air ambiant). La puissance électrique P_e et ΔT sont donc reliés par G_T la conductance totale de la structure [79] suivant l'équation:

$$P_e = G_T \cdot \Delta T \tag{2.41}$$

La conductance totale de la structure G_T correspond à la somme des conductances par conduction thermique G_{cond}, par convection G_{conv} et par radiation G_{rad}, soit:

$$G_T = G_{cond} + G_{conv} + G_{rad} \tag{2.42}$$

Dans cette section, nous analysons les transferts de chaleur par conduction thermique uniquement. Les gradients de température se situent principalement dans le bras de la structure reliant la résistance de chauffage au substrat de silicium et dans l'air ambiant. Ceci vient du fait que le métal utilisé est un excellent conducteur thermique et recouvre pratiquement toute la surface du diélectrique sous-jacent [21]. On utilise l'équation 2.40 pour calculer le flux de

chaleur entre la résistance de chauffage et le substrat de silicium au travers de la structure bicouche, caractérisée par une conductance $G_{cond,1}$ dans un milieu solide:

$$G_{cond,1} = G_{Al} + G_{SiO2} \tag{2.43}$$

A.N.: $\cong 235\ W/m{\cdot}K{\cdot}(10\mu m^2/200\mu m) + 1{,}4\ W/m{\cdot}K{\cdot}(2{,}4{\cdot}161\mu m^2/200\mu m) \cong 14{,}45\ \mu W/K$

Cette application numérique utilise les dimensions de la partie 1 du microactuateur. On retrouve avec G_{Al}, l'inverse de la résistance thermique R_{th1} calculée à l'équation 2.16. Ce calcul, montre que la conduction de la chaleur a essentiellement lieu dans les lignes conductrices en aluminium vers le substrat de silicium du fait que le diélectrique a une très faible conductivité thermique. La conductance thermique de l'air situé à l'intérieur de la cavité micro-usinée, caractérisé par une conductivité thermique k_{air} = 0,02512 W/m°C à 20°C [76], est obtenue à partir de la même équation 2.40:

$$G_{cond,2} = G_{air} = k_{air}{\cdot}A_{air}/L_{air} \tag{2.44}$$

A.N.: $\cong 0{,}02512\ W/m{\cdot}K\ (430\mu m{\cdot}166\mu m/70\ \mu m) = 25{,}6\ \mu W/K$

Cette équation montre que la conduction thermique dans l'air ambiant est directement proportionnelle à la surface de la structure. Afin de réduire les pertes de chaleur dans l'air situé sous la structure, il est donc préférable de minimiser la surface de la structure tel qu'il a été effectué dans le section précédente en minimisant les surfaces des bilames A et B. Pour cette application numérique, la distance L_{air} de 70 µm correspond à la profondeur de la cavité micro-usinée par rapport à la surface de l'échantillon lorsque la structure est maintenue dans le plan du substrat. En réalité, L_{air} correspond à la distance entre la base de la structure et le fond de la cavité et de ce fait, varie suivant la déflexion de la poutre.

2.4.3.2 La convection thermique

La convection thermique fait référence au transfert de chaleur qui se produit entre une surface et un fluide en mouvement lorsqu'ils sont à différentes températures [78]. En convection libre ou naturelle, provoquée par la seule différence de température, le flux de chaleur par unité de surface et de temps, est proportionnel à la différence de température entre la surface T_s et le fluide T_{amb} selon la loi de refroidissement de Newton:

$$\Phi' = h_{conv} \cdot (T_s - T_{amb}) \quad [W/m^2] \tag{2.45}$$

où h_{conv} est le coefficient moyen de convection naturelle.

La résistance thermique pour la convection à la surface d'une plaque d'aire A est donc défini par:

$$R_{th,conv} = \frac{T_s - T_{amb}}{\Phi} = \frac{1}{h_{conv} \cdot A} \tag{2.46}$$

En convection naturelle, le mouvement du fluide est dû aux variations de sa masse volumique dues aux échanges de chaleur entre le fluide et les parois. Dans le cas d'une plaque plus chaude que le milieu ambiant ayant sa face chauffante tournée vers le haut, le fluide chaud plus léger a tendance à s'élever, ce qui permet au fluide froid de descendre et le remplacer d'où la naissance de courants de convection (même dans un fluide stagnant). Au contraire, lorsque la face chauffante est tournée vers le bas, le fluide chaud est difficilement remplacé par du fluide froid d'où des échanges par convection plus faibles si la face chauffante est tournée vers le bas [76].

Pour la convection naturelle, le nombre de Grashof qui conditionne la nature laminaire ($Gr < 10^9$) ou turbulente ($Gr > 10^9$) de l'écoulement dans la zone perturbée, est défini par:

$$Gr = \frac{L^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T}{\mu^2} \tag{2.47}$$

où L est une dimension linéaire permettant de calculer la surface d'échange; β est le coefficient de dilatation volumique du fluide à pression constante (pour l'air, $\beta = 1/T$ avec $T=(T_s+T_m)/2+273$ en kelvins); $\Delta T = T_s - T_{amb}$ est la différence de température entre la paroi chauffante et le fluide; g est l'accélération de la pesanteur (9,81 m/s^2); ρ et μ sont respectivement la masse volumique et la viscosité dynamique du fluide. La viscosité cinématique υ est obtenue en divisant la viscosité dynamique μ par la masse volumique ρ soit $\upsilon = \mu / \rho$ [m^2/s]. Le nombre de Rayleigh Ra est le produit des nombres de Grashof Gr et de Prandtl Pr soit:

$$Ra = Gr \cdot Pr \tag{2.48}$$

avec $$Pr = \frac{\mu Cp}{k} \tag{2.49}$$

où C_p et k sont respectivement la chaleur spécifique et la conductivité thermique du fluide. La conductivité thermique k et la viscosité dynamique μ de l'air augmentent avec la température T suivant la loi de Sutherland [76]:

$$k = k_0 \cdot f(T) \ \ [W/m \cdot K] \qquad \mu = \mu_0 \cdot f(T) \ \ [N \cdot s/m^2]$$

avec $$f(T) = \frac{1+125/273}{1+125/T}\sqrt{\frac{T}{273}} \ \ (T \text{ en K})$$

où $k_0 = 0{,}02313$ W/m·K et $\mu_0 = 17{,}19 \cdot 10^{-6}$ N·s/m^2 à 0°C

La masse volumique de l'air ρ (kg/m3) à une température T(°C) et une pression relative p(bars) sont reliés par l'équation [76]: $\rho = \rho_0 \cdot (1+p) \cdot \frac{273}{T+273}$ [kg/m^3]

avec ρ_0 = 1,275 kg/m^3 dans les conditions standards de température et de pression. Rappelons que 1 bar = 10^5 Pa et 1 atm = 1,013 bar = 760 mm Hg.

Pour la structure de la figure 2.21, le calcul du nombre de Grashof selon l'équation 2.47) avec une température de la résistance de chauffage T_s = 140°C (à la pression atmosphérique et à la température ambiante T_{amb} = 20°C) donne:

A.N.: $Gr = [(166 \cdot 10^{-6}m)^3 \cdot (1{,}119 kg/m^3)^2 \cdot 9{,}81 m/s^2 \cdot 120K] / [353K \cdot (2{,}10 \cdot 10^{-5} kg/m \cdot s)^2] = 0{,}043$

Gr est inférieur à 10^9, par conséquent, la convection naturelle dans l'air sur la plaque chauffante est bien laminaire. Par ailleurs, le calcul du nombre de Prandtl selon l'équation 2.49 donne:

A.N.: $Pr = (2{,}10 \cdot 10^{-5} kg/m \cdot s \cdot 1009 J/kg \cdot K) / (0.02831 J/m \cdot s \cdot K) = 0{,}748$

D'après l'équation 2.48, on obtient un nombre de Rayleigh Ra = 0,032 nettement inférieur au nombre de Rayleigh critique de 1708. Les nombres de Grashof et de Rayleigh mesurent le rapport entre les forces de flottaison et les forces visqueuses dans le fluide. Lorsque Ra est inférieur au nombre de Rayleigh critique, les forces de flottaison ne peuvent dépasser la résistance imposée par les forces visqueuses et il n'y a pas de convection. Par conséquent, à cette étape de notre analyse thermique de la structure illustrée sur la figure 2.21, le transfert de chaleur entre la base de la structure bilame et le fond de la cavité s'effectue uniquement par conduction thermique dans l'air [78].

2.4.3.3 Le rayonnement thermique

Le troisième mode de transfert de chaleur est le rayonnement thermique correspondant à l'énergie thermique émise par la matière se trouvant à une température finie. L'énergie de radiation est transportée par des ondes électromagnétiques et ne nécessite pas la présence d'un milieu (la radiation est en fait plus efficace dans le vide qui est un milieu parfaitement transparent) [78]. Selon la loi de Stefan-Boltzmann, l'échange de rayonnement thermique entre une petite surface A de température absolue T_s et une plus grande surface isotherme qui l'entoure complètement, T_{amb} s'exprime par:

$$\Phi'_{rad} = \varepsilon\sigma \cdot (T_s^4 - T_{amb}^4) \qquad (2.50)$$

où $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W/m^2·K^4 est la constante de Stefan-Boltzmann et ε l'émissivité de la surface telle que $0 \leq \varepsilon \leq 1$ (pour un corps noir, $\varepsilon = 1$).

Pour la structure illustrée sur la figure 2.21, en prenant une émissivité maximale de 1, le flux de chaleur émis par rayonnement dans l'air ambiant est donc:

$$\Phi_{rad} = \varepsilon\sigma A \cdot (T_s^4 - T_{amb}^4) \tag{2.51}$$

A.N.: $= 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W/m^2·K^4·(430·166·10^{-12}m^2) [(413K)^4-(293K)^4] = 87,9 µW

Dans le cas d'un échange par rayonnement thermique entre deux parois de température T_1 et T_2 séparées par un milieu transparent, le flux de chaleur échangé s'écrit sous la forme [76]:

$$\Phi_{rad} = \varepsilon_{12}\sigma A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \cong h_{rad} A \cdot (T_1 - T_2) \tag{2.52}$$

où $h_{rad} = \varepsilon_{12}\sigma \cdot (T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2)$ est le coefficient équivalent d'échange par rayonnement et $\varepsilon_{12} = \varepsilon_1\varepsilon_2/[1-(1-\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2)]$ est l'émissivité équivalente des deux parois.

Notons que la résistance thermique pour la radiation est définie par:

$$R_{th,rad} = \frac{T_s - T_{amb}}{\Phi_{rad}} = \frac{1}{h_{rad} A} = \frac{1}{G_{th,rad}} \tag{2.53}$$

En prenant une émissivité équivalente ε_{12} maximale égale à 1 et en supposant le substrat de silicium à la température ambiante, le transfert de chaleur par rayonnement entre la base de la poutre et le fond de la cavité correspond sensiblement au calcul précédent dans l'air ambiant (équation 2.51). Nous déduisons de l'équation 2.53 une conductance thermique pour la radiation:

$$G_{th,rad} = \frac{\Phi_{rad}}{T_s - T_{amb}}$$

A.N.: $= (87{,}9\ \mu W)/(120K) = 0{,}73\ \mu W/K$

Il apparaît que la conductance thermique par radiation $G_{th,rad} = 0{,}73$ µW/K est négligeable devant les conductances thermiques par conduction $G_{cond,1} = 14{,}45$ µW/K et $G_{cond,2} = 25{,}6$ µW/K calculées précédemment.

Nous pouvons donc considérer que les transferts de chaleur pour la structure bilame illustrée sur la figure 2.21 s'effectuent exclusivement par conduction thermique dans le bras qui la relie au substrat et dans la cavité d'air située en dessous.

2.4.4 Modélisation thermique du microactuateur bimorphe

Les calculs de transferts de chaleur pour la structure en porte-à-faux comprenant une résistance de chauffage (figure 2.21) ont montré la prédominance de la conduction thermique dans la structure et dans l'air ambiant par rapport aux échanges de chaleur par convection et par radiation. Dans le cas du microactuateur (composé de deux résistances de chauffages et d'un pad court-circuiteur), les pertes de chaleur par convection et rayonnement sont également négligeables devant la conduction thermique dans la structure et dans l'air stagnant de la cavité. La figure 2.23 illustre les différents modes de transferts de chaleur pour le microactuateur composé de deux bilames et d'un pad court-circuiteur.

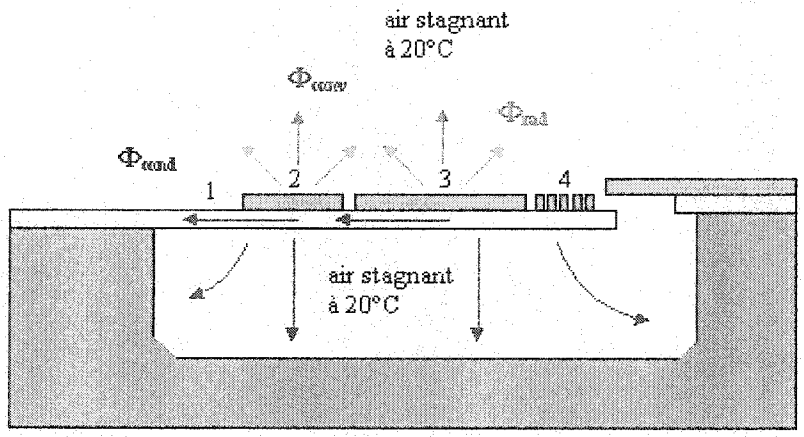


Figure 2.23: Bilan des modes de transfert de chaleur pour le microactuateur.

2.4.4.1 Apport de chaleur par effet joule

Considérons la puissance électrique P_e dissipée par effet joule dans la masse m d'une résistance de chauffage R_e traversée par un courant continu I ($P_e = R_e \cdot I^2$). La chaleur se dissipe vers l'extérieur au travers de la surface S de la résistance de chauffage. En régime transitoire, l'accumulation d'un flux de chaleur $\Delta\Phi$ entraîne une augmentation de la température T d'une masse m au cours du temps t suivant la relation:

$$\Delta\Phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = mC_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \qquad (2.54)$$

Si un échange de chaleur avec un coefficient h s'effectue avec le milieu environnant à la température ambiante T_{amb}, l'équation 2.54 appliquée à la résistance précédente chauffée en courant continu donne [76]:

$$P_e - \Phi = P_e - hS(T - T_{amb}) = mC_p \frac{dT}{dt} \tag{2.55}$$

À partir d'une température initiale T_0, la température de la résistance de chauffage augmente jusqu'à sa valeur d'équilibre T_l. Par conséquent, la solution de l'équation différentielle 2.55 est de la forme [76]:

$$T = T_l + (T_0 - T_l) \cdot e^{-t/\tau} \tag{2.56}$$

où $T_l = T_{amb} + \frac{P_e}{hS}$ est la température d'équilibre en régime permanent

et $\tau = \frac{mC_p}{hS}$ le temps caractéristique du régime transitoire (voir chapitre 5). (2.57)

La figure 2.24 illustre une portion de la structure bimorphe de conductivité thermique k_s suspendue à une hauteur h au-dessus d'un substrat et séparé de celui-ci par une cavité d'air de conductivité thermique k_{air}.

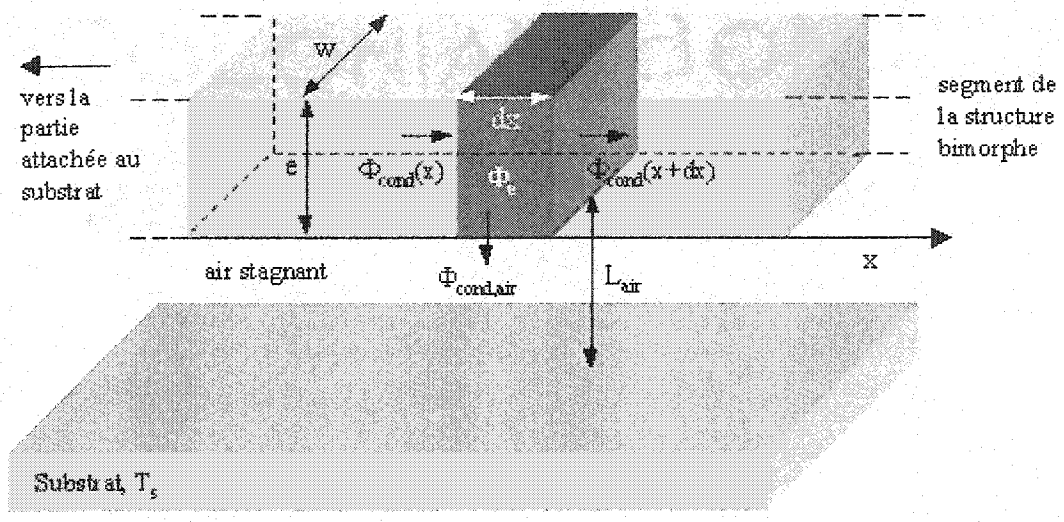


Figure 2.24: Bilan des transferts de chaleur dans un élément de volume de la structure bimorphe suspendue au dessus d'un substrat.

Appliquons l'équation 2.54 de conservation de la chaleur en régime permanent pour un élément de volume de la structure bimorphe de longueur dx, de section A = w·e tel qu'illustré sur la figure 2.24:

$$\Phi_{cond}(x) - \Phi_{cond}(x+dx) - \Phi_{cond,air}(x) + \Phi_e = 0 \tag{2.58}$$

L'équation 2.58 avec les expressions des flux de chaleur par conduction thermique dans la structure et dans l'air ambiant ainsi que le flux de chaleur dissipée devient:

$$k_c A \cdot \frac{1}{dx}\left[\frac{dT(x+dx)}{dx} - \frac{dT(x)}{dx}\right] - \frac{k_{air} w}{L_{air}} \cdot (T - T_s) + P_e \cdot A = 0$$

$$\Leftrightarrow \quad \frac{d^2T(x)}{d^2x} - \frac{k_{air}}{k_c L_{air} e} \cdot (T - T_s) + \frac{P_e}{k_c} = 0 \tag{2.59}$$

En notant, $u(x) = T(x) - T_s$, l'équation 2.59 devient:

$$\frac{d^2u(x)}{d^2x} - \frac{k_{air}}{k_c L_{air} e} \cdot u(x) + \frac{P_e}{k_c} = 0 \tag{2.60}$$

Avec les notations:

$$\lambda^2 = \frac{k_{air}}{k_c L_{air} e} \qquad \text{et} \qquad \beta^2 = \frac{P_e}{k_c},$$

l'équation 2.60 peut donc se mettre sous la forme:

$$\frac{d^2u(x)}{d^2x} - \lambda^2 u(x) + \beta^2 = 0 \tag{2.61}$$

Cette équation admet une solution de la forme:

$$u(x) = C \cdot sh(\lambda x) + D \cdot ch(\lambda x) + \frac{\beta^2}{\lambda^2} \tag{2.62}$$

Les constantes C et D sont déterminées à partir des conditions aux limites. La section suivante applique cette relation aux différentes parties du microactuateur afin de déterminer la distribution de température le long de la structure.

2.4.4.2 Profils thermiques du microactuateur

Pour l'analyse des transferts de chaleur au sein du microactuateur, on suppose que la température est constante sur toute la région chauffée du bilame du fait que la résistance de chauffage en aluminium est uniformément répartie sur la base en oxyde de silicium de la poutre.

Microactuateur chauffé par le bilame A:

En prenant le cas où seul le bilame A est chauffé, on considère que sa température est uniforme. Étant donné que la conductance thermique de la couche d'oxyde du bilame A est très élevée comparativement à celle de l'air ambiant situé en dessous (voir équation 2.44):

$G_{thA.SiO2} = 1{,}4 W/m{\cdot}K \cdot (180\mu m \cdot 230\mu m)/3\mu m = 19{,}3\ mW/m{\cdot}K$

on peut aussi considérer que l'aluminium et l'oxyde sont à une même température uniforme. La figure 2.25 illustre le chauffage du bilame A seulement à une température constante T_A.

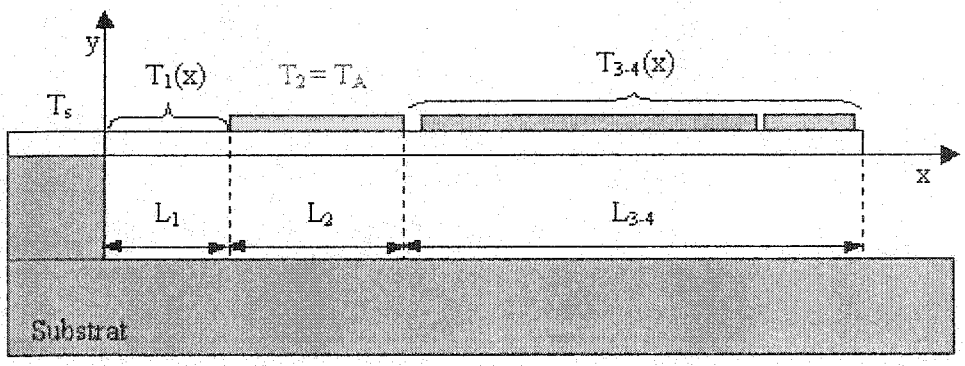


Figure 2.25: Schéma du microactuateur lors du chauffage du bilame A à une température uniforme T_A (vue en coupe non à l'échelle).

1) Dans la région du bilame A, étant donné que nous avons supposé une température uniforme, on peut considérer que la dérivée seconde de $u_2(x)$ est négligeable devant les autres termes de l'équation 2.61, on obtient donc:

$$u_2(x) = \frac{\beta^2}{\lambda^2} = \frac{P_e L_{air} e}{k_{air}} = T_2(x) - T_s$$

$$\Leftrightarrow \qquad T_2(x) = \frac{P_e L_{air} e}{k_{air}} + T_s = T_A \qquad (2.63)$$

La température T_A est une constante, indépendante de x sur toute la région où la puissance P_e est dissipée. On observe que la température maximale est proportionnelle à la distance h séparant le bilame A du substrat.

2) Pour la partie 1 du microactuateur correspondant au bras qui relie le bilame A au substrat, on a $\beta = 0$, l'équation 2.61 devient donc:

$$\frac{d^2u_1(x)}{d^2x} - \lambda_1{}^2 u_1(x) = 0 \tag{2.64}$$

Elle admet une solution du type:

$$u_1(x) = C_1 \cdot sh(\lambda_1 x) + D_1 \cdot ch(\lambda_1 x) \tag{2.65}$$

où les constantes C_1 et D_1 sont déterminées à partir des conditions aux limites:

$1^{ère}$ condition: $u_1(0) = T_1(0) - T_s = 0$

$2^{ième}$ condition: $u_1(L_1) = T_A - T_s = 0$

On en déduit la distribution en température sur la partie 1 du microactuateur correspondant au "bras gauche" du bilame A:

$$T_1(x) = T_s + (T_A - T_s)\frac{sh(\lambda_1 x)}{sh(\lambda_1 L_1)} \tag{2.66}$$

3) Pour les parties 3 et 4 du microactuateur qui correspondent au "bras droit" du bilame A et sont composés des mêmes matériaux, $u_{3\text{-}4}(x)$ vérifient des équations similaires à 2.64 et 2.65 avec des conditions aux limites différentes:

$1^{ère}$ condition: $u_{3-4}(L) = T_A - T_s$ où $L = L_1+L_2$

$2^{ème}$ condition: $\frac{du_{3-4}(L')}{dx} = 0$ (adiabatique) avec $L' = L_1+L_2+L_3+L_4$

Ainsi la distribution de température sur les parties 3 et 4 du microactuateur correspondant au "bras droit" du bilame A est donnée par:

$$T_{3-4}(x) = T_s + (T_A - T_s)\frac{ch[\lambda_{3-4}(x - L')]}{ch[\lambda_{3-4}(L'-L)]} \tag{2.67}$$

Microactuateur chauffé par le bilame B:

Des calculs similaires en chauffant uniquement le bilame B permettent d'obtenir la distribution en température correspondante. La figure 2.26 illustre le chauffage du bilame B seulement dans le microactuateur à une température uniforme $T_B = T_3$.

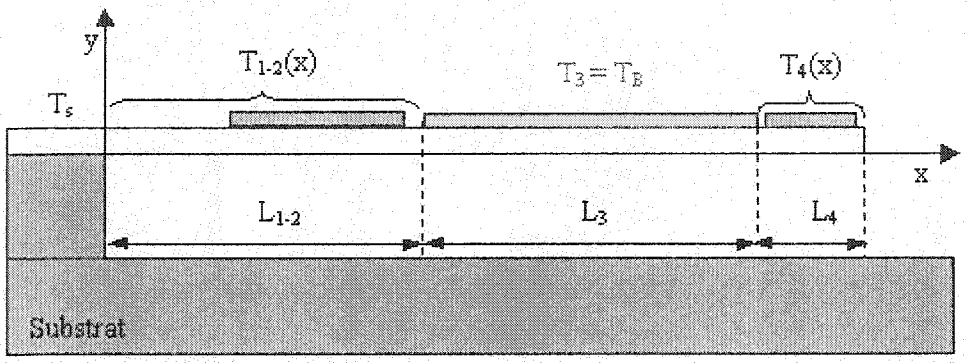


Figure 2.26: Schéma du microactuateur avec chauffage du bilame B à une température uniforme T_B (vue en coupe non à l'échelle).

Le "bras gauche" du bilame B comprend les parties 1 et 2, tandis que le "bras droit" est composé de la partie 4. Les distributions de températures obtenues à partir des équations 2.61 et 2.62 sont:

$$T_3(x) = \frac{P_e L_{air} e}{k_{air}} + T_s = T_B \tag{2.68}$$

$$T_{1-2}(x) = T_s + (T_B - T_s)\frac{sh(\lambda x)}{sh(\lambda L_{1-2})} \tag{2.69}$$

$$T_4(x) = T_s + (T_B - T_s)\frac{ch[\lambda(x - L')]}{ch[\lambda(L_4)]} \tag{2.70}$$

avec $L' = L_{1-2}+L_3+L_4$

Profils thermiques du microactuateur lors du chauffage des bilames A et B:

À partir des calculs précédents, les profils thermiques du microactuateur lors du chauffage des bilames A et B, selon notre modèle analytique simplifié, sont illustrés à la figure 2.27. La courbe correspondant au chauffage simultané des deux bilames, a été tracée en additionnant les profils thermiques obtenus pour le chauffage séparé des bilames. Cette distribution de température tient compte du fait que chaque bilame atteint une température supérieure due au chauffage du bilame adjacent.

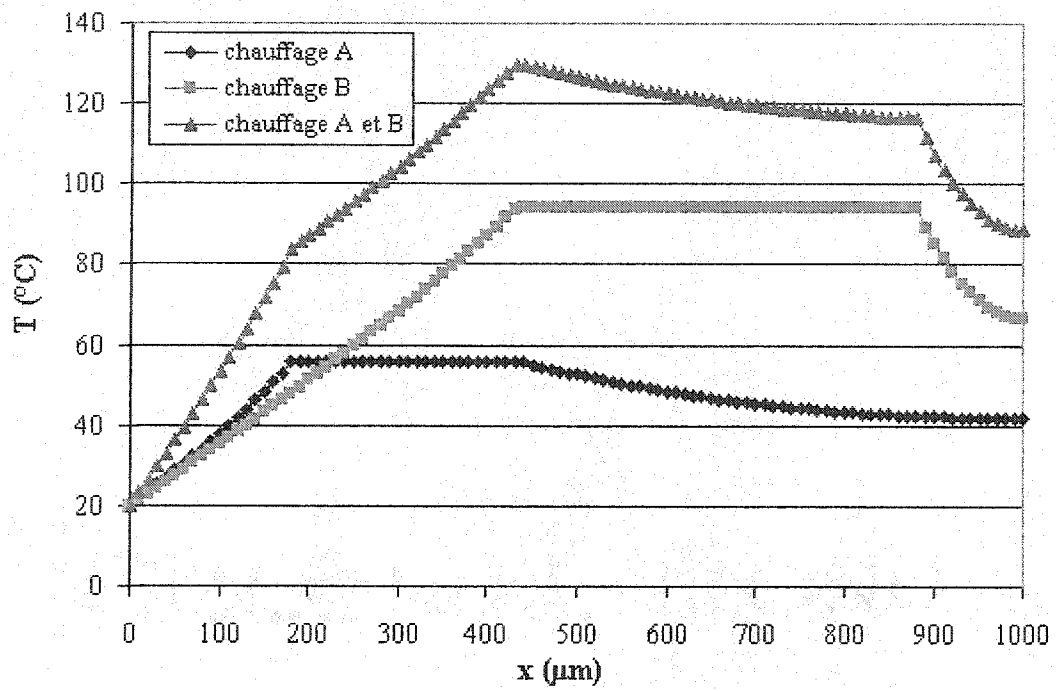


Figure 2.27: Profils thermiques du microactuateur lors du chauffage des bilames selon le modèle analytique simple.

2.4.4.3 Activation du microactuateur dans le vide

Les profils de température obtenus précédemment impliquent le chauffage des bilames dans l'air ambiant. Si λ tend vers 0, ce qui correspondrait à faire fonctionner le microactuateur dans le vide, l'équation 2.66:

$$T_{1,vide}(x) = T_s + (T_A - T_s)\frac{x}{L_1} \tag{2.71}$$

Cette équation montre que le profil de température entre le substrat et le bilame A est linéaire dans le vide puisqu'il n'y a pas de perte de chaleur dans la cavité située sous la structure. De la même façon, en faisant tendre λ vers 0, l'équation 2.67 devient:

$$T_{3-4,vide} = T_A \tag{2.72}$$

Dans le vide, le "bras droit" du bilame A se retrouve à la même température que ce dernier puisqu'il n'y a aucune perte de chaleur dans l'air ambiant.

Une simulation par éléments finis du profil thermique du microactuateur opérant dans le vide a été effectuée à l'aide du logiciel Ansys en chauffant le bilame A avec ΔT_A = 120°C et en fixant la température du substrat T_s = 20°C comme condition aux limites pour la partie attachée de la poutre. On observe un gradient de température linéaire entre le bilame chauffé et le substrat (illustré sur la figure 2.28) tandis que le restant de la structure se trouve à la même température que le bilame A (système adiabatique). Ces résultats viennent confirmer ceux obtenus précédemment au moyen de notre modèle analytique. De même, dans le cas où le microactuateur B est chauffé dans le vide, une simulation par éléments finis montre un gradient de température linéaire sur le "bras gauche" du bilame B (incluant la partie 1 du microactuateur et le bilame A) tandis que le "bras droit" du bilame B se retrouve à la même température que ce dernier puisqu'il n'y a pas de pertes de chaleur par conduction thermique dans le milieu environnant.

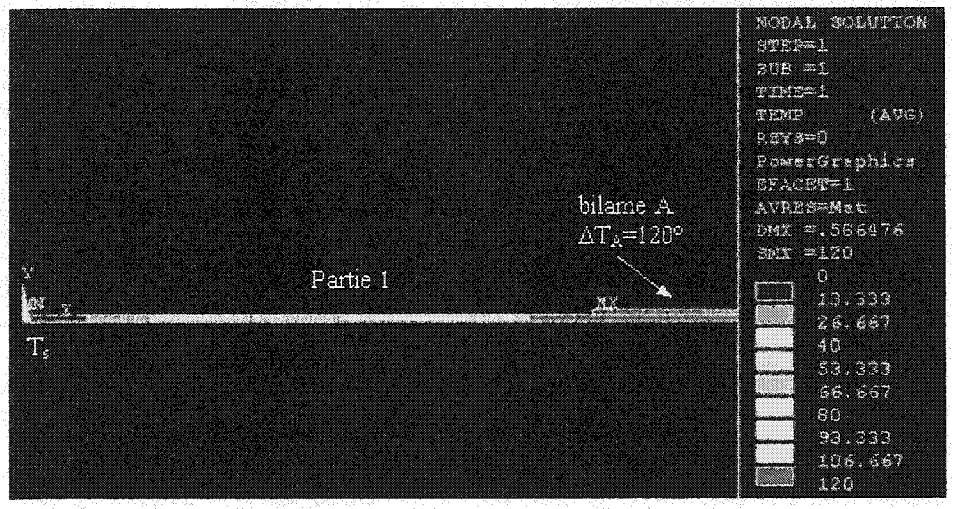


Figure 2.28: Simulation par éléments finis (Ansys) du profil thermique dans la partie 1 du microactuateur lors du chauffage du bilame A.

Pour une activation du microactuateur dans le vide, il faudrait également tenir compte des pertes de chaleur par rayonnement qui sont proportionnelles aux températures atteintes dans la structure. Cependant, nous avons montré que dans la gamme de températures utilisées, les pertes de chaleur par rayonnement étaient négligeables devant celles par conduction thermique dans la structure. Ainsi, une activation du microactuateur dans des conditions de vide permettrait d'obtenir des températures plus élevées dans les bilames, et de ce fait, de plus grandes déflexions à puissance électrique égale.

2.4.4.4 Conductances thermiques des bilames A et B

Déterminons, dans le cas du chauffage du bilame A, la puissance électrique P_A qu'il est nécessaire d'appliquer pour lui permettre d'atteindre une certaine température T_A en régime permanent. Pour ceci établissons pour le bilame A, le bilan des flux de chaleur suivant la loi de conservation de l'énergie et les notations des figures 2.24 et 2.25:

$$\Phi_1(L_1) + \Phi_{2,air}(L_{air}) + + \Phi_{3-4}(L_{3-4}) = P_A \tag{2.73}$$

avec:

$$\Phi_1(L_1) = k_1 w_1 e_1 \frac{dT_1(L_1)}{dx} = k_1 w_1 e_1 \cdot (T_A - T_s) \cdot \lambda_1 \cdot \coth(\lambda_1 L_1)$$

$$\Phi_{2.air}(h) = k_{air} \cdot \frac{W_2 L_2 (T_A - T_s)}{L_{air}}$$

$$\Phi_{3-4}(L_{3-4}) = k_{3-4} W_{3-4} e_{3-4} \frac{dT_{3-4}(L_{3-4})}{dx} = k_{3-4} W_{3-4} e_{3-4} \cdot (T_A - T_s) \cdot \lambda_{3-4} \cdot \mathrm{th}(\lambda_{3-4} L_{3-4})$$

où $\lambda_1 = \dfrac{k_{air}}{k_1 L_{air} e_1}$ et $\lambda_{3-4} = \dfrac{k_{air}}{k_{3-4} L_{air} e_{3-4}}$

La puissance électrique P_A nécessaire pour le chauffage du bilame A à une température T_A en mode statique, est donc donnée par:

$$P_A = \left[k_1 W_1 e_1 \lambda_1 \coth(\lambda_1 L_1) + k_{air} \frac{W_2 L_2}{L_{air}} + k_{3-4} W_{3-4} e_{3-4} \lambda_{3-4} \mathrm{th}(\lambda_{3-4} L_{3-4}) \right] \cdot (T_A - T_s) \tag{2.74}$$

Rappelons qu'en régime permanent, selon l'équation 2.41, nous avons:

$$P_A = G_{thA} \cdot \Delta T_A \tag{2.75}$$

L'équation 2.74 nous permet de calculer les composantes de la conductance thermique G_{thA} sur le "bras gauche" ($G_{thA,1}$), sous le bilame A ($G_{thA,2}$) et sur le "bras droit" ($G_{thA,3\text{-}4}$). Pour les conductivités thermiques k_1 et $k_{3\text{-}4}$ nous avons utilisé l'équation 2.40 pour calculer la conductivité thermique équivalente k_{eq} définie par:

$$G_{eq} = \frac{k_{eq} \cdot A_{eq}}{L} = \sum_i \frac{k_i \cdot A_i}{L_i} \tag{2.76}$$

où $A_{eq} = \sum_i A_i$ et $L_i = L$

De la même façon, nous pouvons déterminer la puissance P_B qu'il est nécessaire d'appliquer au bilame B pour lui permettre d'atteindre une température T_B. Notre modélisation thermique du

microactuateur nous permet donc de calculer les conductances thermiques théoriques des bilames A et B. Les tableaux 2.3 et 2.4 présentent les résultats obtenus pour le microactuateur comprenant les couches mince SiO_2 et Al avec des épaisseurs respectives de 2,56 µm et 0,8 µm.

Tableau 2.3: Conductance thermique théorique du bilame A calculée à partir du modèle thermique du microactuateur bimorphe.

	$G_{thA,1}$ (µW/K)	$G_{thA,2}$(µW/K)	$G_{thA,3-4}$(µW/K)	G_{thA} (µW/K) total
vide	19,7	0	0	19,7
air ambiant	24,0	16,4	22,4	62,8

Tableau 2.4: Conductance thermique théorique du bilame B calculée à partir du modèle thermique du microactuateur bimorphe.

	$G_{thB,1-2}$(µW/K)	$G_{thB,3}$(µW/K)	$G_{thB,4}$(µW/K)	G_{thB}(µW/K) total
vide	46,4	0	0	46,4
air ambiant	56,9	20,8	10,9	88,6

Dans le vide, les résultats indiqués aux tableaux 2.3 et 2.4 montrent que les pertes de chaleur s'effectuent uniquement par conduction thermique dans la partie du microactuateur reliant la résistance chauffée au substrat. La conductance thermique du bilame B est plus élevée du fait que ses pertes de chaleur, par conduction thermique, s'effectuent non seulement sur la partie 1 du microactuateur mais également sur la partie 2 qui est non chauffée.

Dans l'air ambiant, les composantes $G_{thA,1}$ et $G_{thB,1-2}$ sont supérieures à 22% des celles obtenues dans le vide et traduisent les pertes de chaleur additionnelles dans l'air situé sous les "bras gauches" des bilames chauffés. Les conductances thermiques $G_{thA,2}$ et $G_{thB,3}$ correspondent aux pertes de chaleur dans l'air situé directement sous les résistances de chauffage. La surface plus élevée du bilame B par rapport à celle du bilame A, explique que $G_{thB,3}$ soit supérieure à $G_{thA,2}$. Tandis que les conductances thermiques $G_{thA,3-4}$ et $G_{thB,4}$ correspondent aux pertes de chaleur dans l'air situé sur les "bras droits" des bilames. Les conductances thermiques pour les bilames A et B sont respectivement de $G_{thA} = 62,8$ µW/K et $G_{thB} = 88,6$ µW/K. Par conséquent, pour des augmentations de température $\Delta T_A = 120°C$ et $\Delta T_B = 160°C$, les puissances électriques à appliquer sont respectivement de $P_A = 7,5$ mW et $P_B = 14,2$ mW.

2.4.5 Design du pad court-circuiteur

Le pad court-circuiteur se situe dans la partie 4 du microactuateur tel qu'illustré à la figure 2.16. De cette façon, lorsque la structure en porte-à-faux se courbe naturellement vers le haut à cause de la relaxation de ses contraintes internes résiduelles, le pad court-circuiteur permet la connexion entre une ligne d'entrée et une ligne de sortie, symbolisé par un pad de surface sur la figure 2.13 et situées sur un circuit imprimé placé au-dessus de la matrice d'actuateurs. La force normale, générée à l'extrémité d'une structure en porte-faux de longueur L, de largeur b, d'épaisseur t et de module d'élasticité E ayant une déflexion verticale d de 100 µm à son extrémité, est obtenue en combinant les équations 2.8 et 2.13 soit:

$$F = \frac{Ebt^3 d}{4L^3} \quad [N] \tag{2.77}$$

A.N.: $F = [0{,}69 \cdot 10^{11} N/m^2 \cdot 140\mu m \cdot (3{,}4\mu m)^3 \cdot 100\mu m] / [4 \cdot (1042\mu m)^3] = 8{,}38\ \mu N$

Afin d'assurer que le pad court-circuiteur peut établir un bon contact électrique (sans courbure autour de l'axe de la poutre) avec le pad de surface, ce dernier sera placé à une hauteur inférieure à celle de la déflexion naturelle de la poutre. Le fait que le pad court-circuiteur effectue un frottement en surface aidera à l'établissement d'un bon contact électrique. En effet, les surfaces métalliques amenées à établir un contact ne sont pas parfaitement lisses et contiennent des aspérités. Par conséquent, la surface de contact effective correspond à la somme des aires correspondant aux régions où les deux métaux entrent parfaitement en contact. La figure 2.29 illustre le pad court-circuiteur faisant la connexion entre une ligne d'entrée et une ligne de sortie lorsque le microactuateur se trouve à l'état ON.

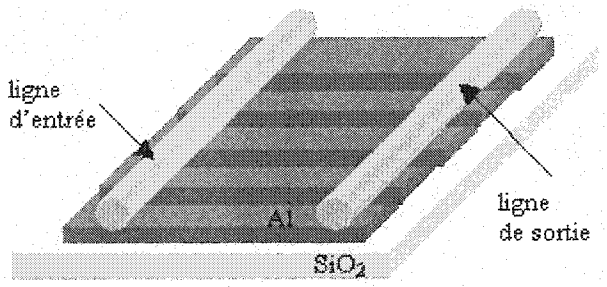


Figure 2.29: Connexion entre ligne d'entrée et une ligne de sortie au moyen du pad court-circuiteur.

La configuration initiale du pad court-circuiteur était celle d'un rectangle de 120 par 150 µm. Celle-ci a été modifiée pour éviter que l'aluminium ne soit gravé au cas où la couche de passivation aurait un défaut localisé et laisserait une ouverture pour la solution de TMAH utilisée en post-traitement. La configuration choisie pour le pad court-circuiteur est celle illustrée sur la figure 2.16. Il est composé de cinq lignes métalliques (largeur et longueur de 20 et 150 µm respectivement) pour éviter que l'aluminium ne soit gravé entièrement sur toute la surface du pad court-circuiteur. La résistance équivalente du pad court-circuiteur est de 57 mΩ et permet le passage d'un courant maximal de 100 mA en respectant la spécification électrique donnée à l'équation 2.17 pour éviter les problèmes d'électromigration.

2.5 Conclusions du chapitre 2

Le microactuateur que nous avons conçu présente l'avantage d'être bistable sans nécessiter l'application permanente d'une puissance électrique pour maintenir ses deux positions stables. Le fonctionnement de notre microactuateur est basé sur le principe simple de l'effet bimorphe. Il est composé d'une structure en porte-à-faux incluant deux bilames A et B, un pad court-circuiteur et une butée. Les actuations thermiques indépendantes et contrôlées des bilames permettent au microactuateur d'effectuer la transition entre ces deux états stables. Le design du microactuateur a été optimisé en réduisant au maximum ses dimensions et sa consommation en puissance électrique tout en permettant les déflexions nécessaires à son actuation. Notre analyse des transferts thermiques a montré que la conduction de la chaleur a essentiellement lieu dans le bras de la structure reliant les résistances de chauffage au substrat (64% pour le bilame B) et dans l'air situé entre la base de la structure bilame et le fond de la cavité micro-usinée (62% pour le bilame A). Le modèle thermique simplifié que nous avons développé pour le microactuateur, a permis l'obtention des profils de température et le calcul des conductances thermiques des bilames A et B.

CHAPITRE 3

CONCEPTION DE LA MICROFABRICATION DU DISPOSITIF EN TECHNOLOGIE CMOS

3.1 Introduction

Notre microactuateur a été fabriqué à partir d'une technologie standard CMOS. Par conséquent, le choix et l'ordre de dépôt des différentes couches minces ne pouvaient pas être modifiés par le concepteur. Par contre les étapes de micro-usinage subséquentes, nécessaires à la libération des composants MEMS, ont été choisies par le concepteur de manière à être compatibles avec le procédé standard CMOS. De cette façon, les parties microélectronique et MEMS du dispositif peuvent être fabriquées simultanément sur le même substrat. Ainsi, un post-traitement, effectué après le dépôt de toutes les couches minces du procédé CMOS, permet de dégager les structures MEMS du substrat sans affecter les circuits microélectroniques de contrôle.

La technologie 1,5 µm CMOS de la fonderie Mitel Semiconducteur (devenue Zarlink Semiconducteur en mai 2001, puis Dalsa Semiconductor en janvier 2002) et le post-traitement Can-MEMS sont présentés au début de ce chapitre ainsi que la conception des plans de masques du microactuateur. La stratégie et les techniques de micro-usinage utilisées dans le post-traitement des échantillons sont présentées à la fin de ce chapitre.

3.2 Conception du dispositif dans une technologie standard CMOS

3.2.1 Description du procédé Mitel 1,5 µm CMOS

Le procédé Mitel 1,5 µm CMOS a pu être utilisé pour fabriquer notre composant MEMS grâce à l'aide de la CMC (Canadian Microelectronics Corporation) qui soutient le développement de la recherche en microélectronique au Canada. La CMC permet aux étudiants universitaires d'utiliser des outils de design tel que Cadence et d'obtenir des dés fabriqués selon différentes technologies disponibles. La technologie Mitel 1,5µm CMOS a été développée de manière à fournir un procédé analogique/digital 5V pour l'industrie et la recherche canadienne. Cette technologie est dédiée à la fabrication de circuits intégrés pour la microélectronique. Il ne s'agit donc pas d'un procédé standard de fabrication pour les MEMS tel que le procédé MUMPS (Multi-User MEMS Process). De ce fait, les couches de métal, de diélectrique et de semi-conducteur doivent être utilisées exactement telles que conçues pour les circuits intégrés. Ce procédé de fabrication comporte notamment deux couches de poly-silicium et deux couches de métal.

La figure 3.1 illustre la séquence complète des couches minces dont l'épaisseur totale atteindre 6 µm [80]. Le procédé Mitel 1,5 µm CMOS utilise un substrat de silicium cristallin {100} légèrement dopé de type n. Une couche d'oxyde thermique de champ (~ 1 µm) est ensuite utilisée comme couche diélectrique afin d'isoler les structures du substrat. S'ensuit le dépôt de deux couches minces de polysilicium cristallin (~ 0,3 µm chacune) peu contraintes et séparées par une fine couche d'oxyde de silicium (~ 50 nm). La couche inter-poly-métallique est une couche de dioxyde de silicium, appelée "oxyde de contact" (~ 0,8 µm). Il s'agit d'un film multicouche contenant du PSG (phosphosilicate glass) mais dont la composition exacte est la propriété exclusive de la fonderie Mitel. La couche suivante est une couche composée d'un alliage d'aluminium (~ 0,8 µm) dont les propriétés chimiques et mécaniques sont indistinctes de celles d'une couche d'aluminium pure. Le dépôt et la mise en forme d'une couche inter-métallique, appelée "oxyde de via" (~ 0,8 µm) et d'une seconde couche d'aluminium (~ 0,8 µm) sont effectués. Pour finir, afin de passiver et de recouvrir la dernière couche de métal, une couche de passivation, composée de dioxyde de silicium (~ 0,5 µm) et de nitrure de silicium (~ 0,5 µm), est déposée par PECVD [80].

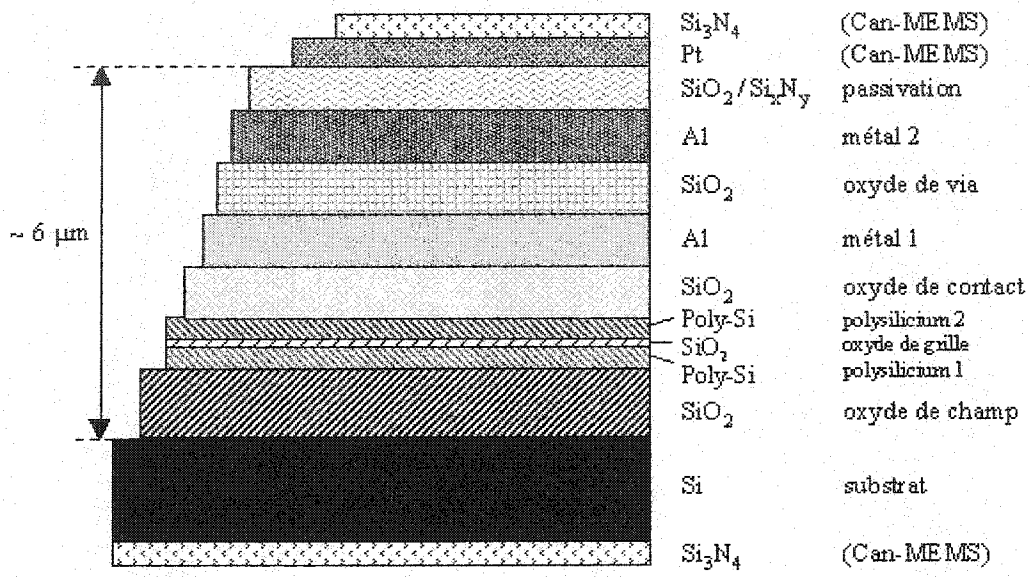


Figure 3.1: Couches minces du procédé Mitel 1,5 µm CMOS (dans l'ordre de dépôt mais non dessinées à l'échelle).

3.2.2 Description du post-traitement Can-MEMS

De 1995 à 1998, la CMC a collaboré avec plusieurs chercheurs afin d'élaborer des projets utilisant la technologie Mitel 1,5µm CMOS pour développer une approche canadienne intitulée Can-MEMS dans l'expérimentation et la fabrication de MEMS. Le design de structures MEMS est différent de celui de circuits microélectroniques étant donné que l'on doit considérer la structure en 3 dimensions. Les MEMS sont des structures mécaniques formées après l'immersion de l'échantillon dans des solutions ou gaz corrosifs souvent incompatibles avec les couches minces déposées. Par conséquent, les matériaux qui sont susceptibles d'être attaqués par ces agents de gravure, doivent être recouverts d'une couche protectrice de chaque de l'échantillon.

Le service Can-MEMS a été développé de manière à permettre un accès à une technologie de micro-usinage incluant le dépôt de couches subséquentes au procédé Mitel, des gravures anisotropes du substrat et des outils de design spécifiques aux MEMS intégrés au logiciel Cadence usuellement employé pour la conception de circuits intégrés. De ce fait, le post-traitement Can-MEMS offre la possibilité de:

- déposer sur la face avant de l'échantillon, une couche de platine (Pt) pouvant être utilisée pour constituer des interconnexions, des électrodes ou des contacts résistants à la corrosion.

- déposer des couches protectrices de nitrure de silicium (Si_3N_4) de chaque côté de l'échantillon; la couche de passivation PPRSiN (pad protection silicon nitride), à l'avant de l'échantillon, peut être utilisée pour passiver des pads de contact ou d'autres structures, tandis que la couche de passivation située à l'endos de l'échantillon peut également être mise en forme de manière à permettre une gravure de structures MEMS au travers du substrat.
- utiliser une couche "open" dans le design d'une structure MEMS afin d'ouvrir directement les couches diélectriques (oxydes thermiques, de contact, de via et couche de passivation) du procédé Mitel jusqu'au substrat tout en respectant les règles de design.
- utiliser une couche "memsdrc" dans le but de définir des zones avec une vérification de règles de design spécifiques aux structures MEMS.
- graver de façon anisotrope le substrat avec: 1) une gravure E1, de courte durée, afin de sous-graver les structures à partir de la face avant de la gaufre, 2) une gravure E2 de longue durée à partir de l'endos de la gaufre. Une gravure E0 consiste uniquement à retirer la passivation des pads de contact pour permettre des micro-soudures.

3.2.3 Implémentation de différentes générations de designs

La CMC soutient la recherche académique et l'enseignement supérieur en microélectronique et microsystèmes au Canada. En effet, la CMC offre la possibilité à la communauté universitaire canadienne d'accéder à des logiciels de design et de simulations de circuits intégrés tel que Cadence pour fabriquer des dispositifs au moyen de différentes technologies de fabrication. Dans le cadre de son programme BEAMS, la CMC permet la conception et la fabrication de composants MEMS avec: la technologie 1,5 µm CMOS de la fonderie Mitel Semiconducteur (Bromont, Canada) pour le micro-usinage en volume; et la technologie MUMPs™ (Multi-User MEMS Processes) de la compagnie Cronos Integrated Microsystems, Inc. pour le micro-usinage en surface. Dans le cadre de ce projet de doctorat, plusieurs soumissions de designs ont été subventionnées par la CMC pour être fabriquées avec une technologie standard CMOS. Les plans de masques conçus pour les différentes générations de microactuateur sont regroupés dans l'annexe A ainsi où plus d'informations concernant la procédure de fabrication des dispositifs MEMS via la CMC sont données.

3.2.4 Conception, design et simulation de la fabrication du microactuateur

La conception de la fabrication du micro-actuateur et la butée a été faite en utilisant tous les matériaux du procédé Mitel 1,5 µm CMOS en respectant l'ordre de dépôt des couches et les principales règles de design. La figure 3.2 montre une coupe transversale du micro-actuateur après le dépôt des couches du procédé Mitel 1,5 µm CMOS.

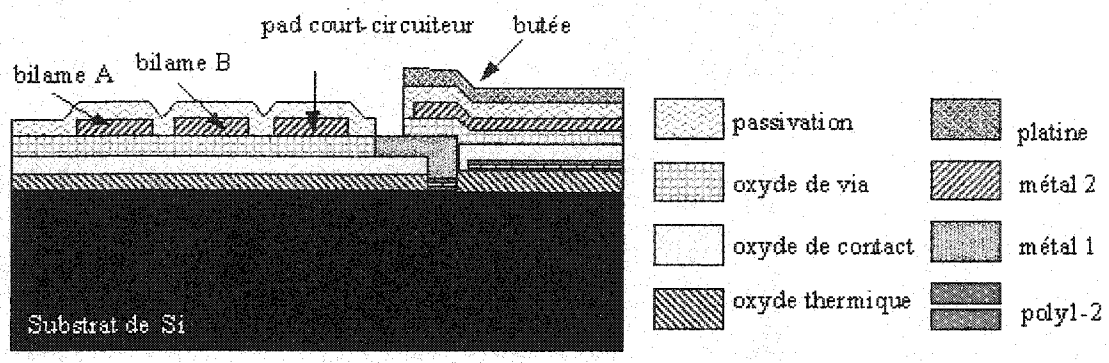


Figure 3.2: Coupe transversale du micro-actuateur après le dépôt des couches minces.

La base de la structure (partie inférieure) sur le substrat est formée deux ou trois couches de dioxyde de silicium (oxyde thermique, oxyde de contact et oxyde de via). Les éléments chauffants A et B se composent de la seconde couche de métal (aluminium) du procédé. La butée est constituée par l'empilement de toutes les couches de dioxyde de silicium du procédé et dans certains cas, des deux couches de poly-silicium et de la seconde couche de métal. Entre l'extrémité de la poutre et la butée, toutes les couches de poly-silicium et d'aluminium sont employées comme couches sacrificielles. L'ensemble de la structure en porte-à-faux et de la butée est recouvert de la couche de passivation. Pour renforcer la butée, une couche de platine est déposée et mise en forme dans l'étape de post-traitement Can-MEMS. Dans certaines séries de fabrication, des couches de nitrures de silicium sont également ajoutées à l'avant et à l'arrière de la gaufre de manière à améliorer la protection de certaines parties de la structure lors de l'étape de libération des actuateurs.

Le design des plans de masques du microactuateur a été réalisé à l'aide du logiciel Cadence (dédié au design et à la simulation de circuits intégrés). Chaque niveau de masque correspond à une couche déposée selon le procédé Mitel. Il est donc possible de dessiner en même temps les masques des structures MEMS et le système d'adressage microélectronique.

Pour le design de structures MEMS, il faut savoir que les couches d'oxyde de champ, d'oxyde de contact et d'oxyde intermétallique sont toutes déposées par défaut. On doit donc dessiner dans Cadence les ouvertures dans ces couches d'oxydes. Par contre, là où on veut avoir les couches de polysilicium et de métal il est nécessaire de dessiner les éléments désirés. La couche de passivation est également déposée par défaut et donc seules les ouvertures dans cette couche sont dessinées. Chaque design soumis à la CMC doit vérifier les nombreuses règles de design rattachées à la librairie Mitel 1,5 µm CMOS. Ces règles étant instaurées pour la fabrication exclusive de circuits intégrés, un certain nombre d'entre elles ne peut être vérifié lors du design de structures MEMS. L'annexe A regroupe les plans de masques qui ont été réalisés pour les différentes générations de microactuateurs fabriqués avec le procédé CMOS. La figure 3.3 présente la superposition des plans de masque du microactuateur appartenant au design ICBPMAT5.

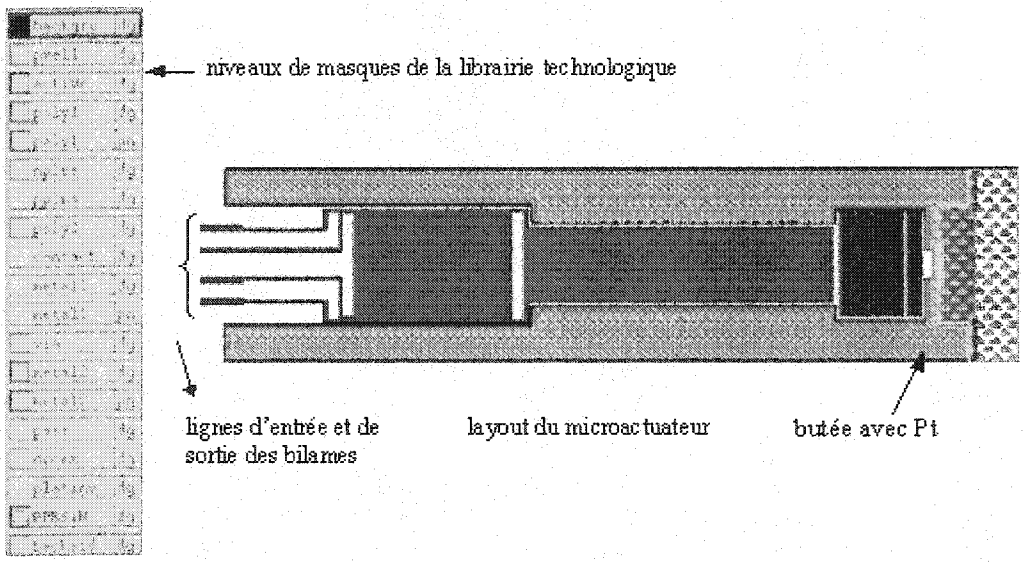


Figure 3.3: Superposition des plans de masques du microactuateur dessinés dans Cadence.

Le design ICBPMAT5 a fait partie de la dernière série de fabrication Mitel 1,5 µm CMOS accessible par la CMC (remplacé par la suite par une autre technologie 0,35 µm CMOS). Ce dernier design a pu bénéficier d'un espace alloué de 9 mm par 9 mm permettant d'intégrer sur le même substrat, une double matrice 3 par 3 reliée directement à un système d'adressage microélectronique (voir annexe B). La figure 3.4 montre les plans de masques du design

ICBPMAT5, réalisés à l'aide du logiciel Cadence. Il est possible d'observer dans la partie supérieure droite du design, un ensemble de trois structures MEMS isolées ainsi que deux colonnes de carrés correspondant à chacune des couches du procédé. Cette partie du dé est conçue dans le but de caractériser les différentes couches minces du procédé CMOS ainsi que la gravure du substrat lors des différentes étapes de micro-usinage.

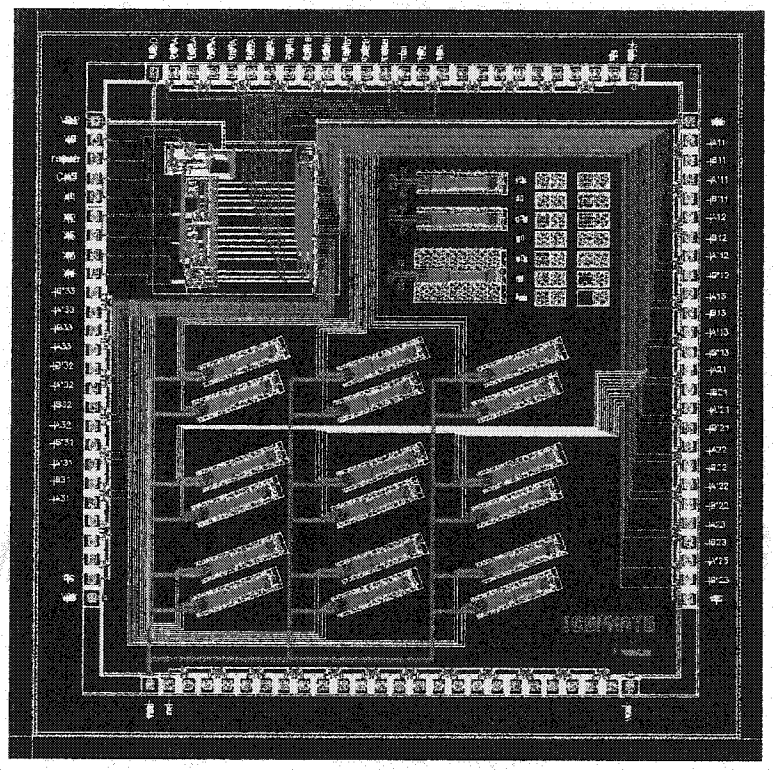
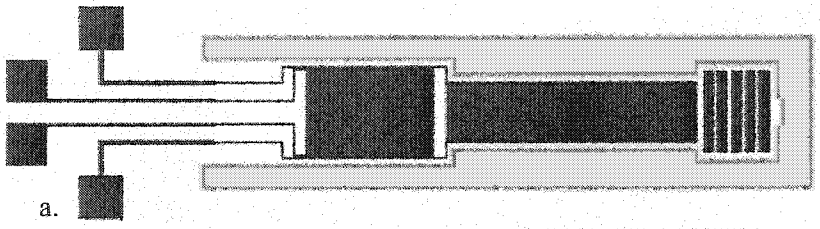
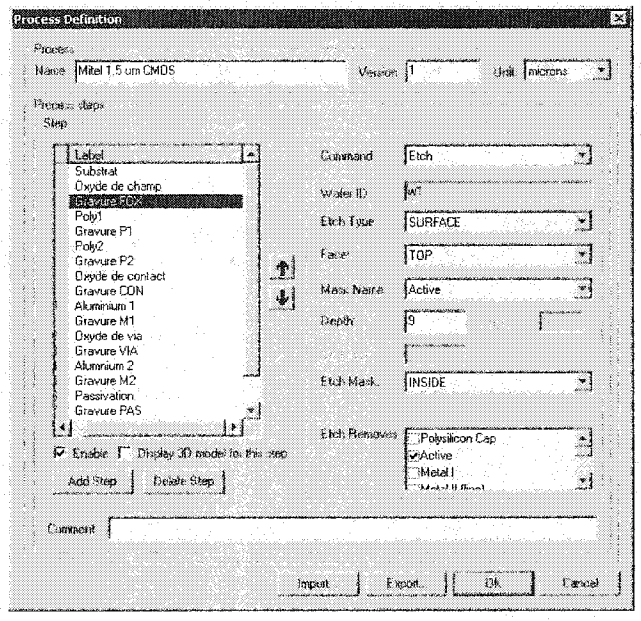


Figure 3.4: Plans de masques du design ICBPMAT5.

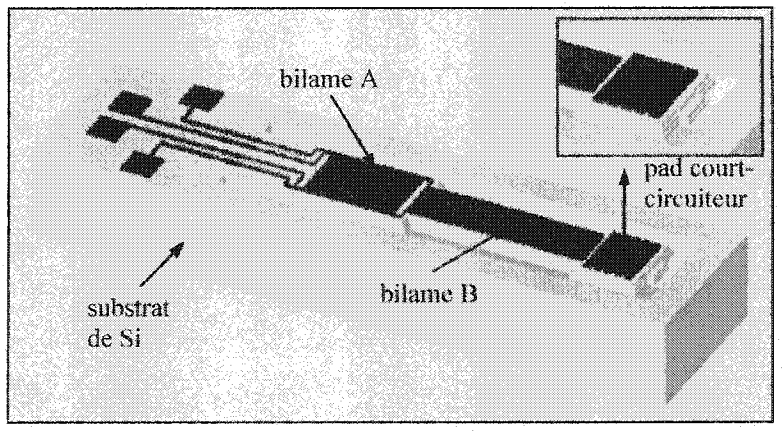
La simulation du procédé de fabrication a été réalisée avec le logiciel MemsproTools V2 tel qu'illustré sur la figure 3.5. La figure 3.5-a montre la vue 2D du microactuateur. Le procédé de fabrication a ensuite été défini pour chaque étape de dépôt et de gravure des couches minces tel qu'illustré à la figure 3.5-b. La figure 3.5-c présente une vue en 3D du microactuateur présenté sans la butée pour permettre la visualisation de l'extrémité de la structure en porte-à-faux. Il faut noter qu'une dernière étape de gravure anisotrope a été rajoutée dans la définition de ce procédé de fabrication pour obtenir une vue de la poutre libérée du substrat.



a.



b.



c.

Figure 3.5: Simulation de la fabrication du microactuateur à l'aide du logiciel MemsproTools: a) plan de masques du microactuateur, b) définition du procédé de fabrication et c) vue en 3D du microactuateur.

3.3 Stratégie et techniques de micro-usinage utilisées en post-traitement

3.3.1 Conception d'une stratégie de micro-usinage en post-traitement

Une vue en coupe du microactuateur après sa fabrication en technologie CMOS a été présentée sur la figure 3.2. Grâce aux ouvertures directes vers le silicium (sur le pourtour de la structure) il est possible de sous-graver le microactuateur pour le libérer du substrat. Une ouverture dans la couche de passivation, située au-dessus de l'extrémité de la poutre, permet de graver les couches sacrificielles séparant la structure en porte-à-faux de la butée. La figure 3.6 présente une vue en coupe (non à l'échelle) du microactuateur après sa libération du substrat et le retrait de la couche de passivation. La relaxation des contraintes internes dans les couches minces entraîne une déflexion de la structure vers le haut (qui n'est pas montrée sur cette figure). L'extrémité de la poutre se retrouvera donc coincée sous la butée après sa libération.

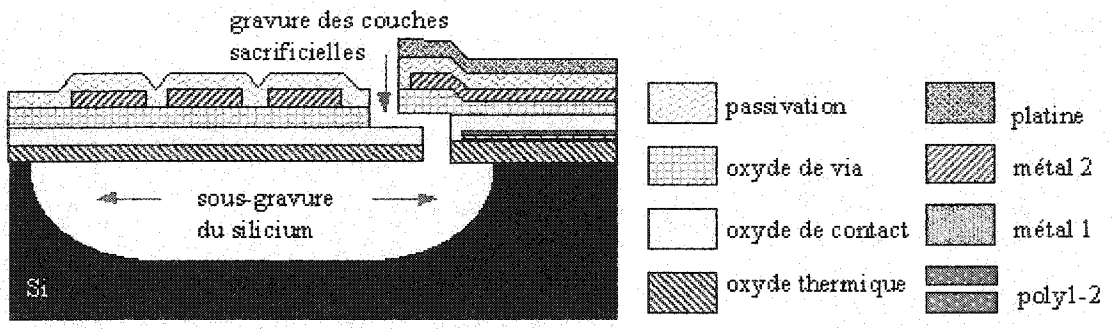


Figure 3.6: Coupe transversale du micro-actuateur après le micro-usinage du substrat et le retrait de la couche de passivation

Pour des composants MEMS de petites dimensions, ayant une longueur inférieure à 200 µm, l'utilisation d'une seule étape de gravure isotrope ou anisotrope est suffisante afin de libérer ces structures. Par contre, pour des microstructures de dimensions plus importantes (longueur comprise entre 1 et 6 mm), une seule étape de gravure réalisée en post-traitement est insuffisante pour les libérer complètement. Les structures de grandes dimensions requièrent de longues durées de gravure, inacceptables car elles peuvent causer des effets négatifs (voir chapitre 4). Une méthode de gravure hybride peut apporter une solution à ce genre de problème en réduisant de façon significative le temps de gravure qui est un facteur primordial pour la fabrication de microstructures de grandes dimensions [81].

Le microactuateur du design ICBPMAT5 a une longueur totale nominale de 1042 µm. Une stratégie de micro-usinage utilisant les avantages d'une gravure hybride [82,83] a donc été conçue pour permettre la libération des microstructures du substrat. Cette stratégie de micro-usinage consiste en 4 étapes effectuées après la fabrication CMOS:

- **Étape 1:** un dépôt de platine en couche mince (par pulvérisation et lift-off) pour protéger la butée du micro-usinage;
- **Étape 2:** une gravure anisotrope au TMAH [84] pour graver les couches sacrificielles et sous-graver au maximum la structure;
- **Étape 3:** une gravure isotrope au XeF_2 [85]pour compléter la sous-gravure rapidement dans un milieu gazeux qui n'attaque pas les matériaux constituant le microactuateur;
- **Étape 4:** une gravure au RIE pour retirer la couche de passivation recouvrant les bilames et le pad court-circuiteur du microactuateur.

L'étape 1 faisait initialement partie du procédé Can-MEMS. Ce service n'étant plus offert par la CMC à partir de 1998, ce post-traitement a dû être effectué au laboratoire LISA. La stratégie de micro-usinage utilise une gravure hybride (étapes 2 et 3) dont les avantages seront présentés de façon plus détaillée dans la section 4.5.4. À l'origine, une seule technique de micro-usinage était utilisée mais elle ne permettait pas de libérer les structures sans qu'elles ne soient endommagées. L'optimisation de l'étape de gravure au TMAH et l'utilisation d'une gravure subséquente au XeF_2 permet de libérer entièrement les structures en les laissant intactes à la fin (voir chapitre 4). Enfin, la gravure au RIE à l'étape 4 est nécessaire pour graver la couche de passivation après son utilisation comme couche protectrice au cours des étapes précédentes.

3.3.2 Techniques de micro-usinage utilisées en post-traitement

Les principes physiques des techniques de micro-usinage utilisées en post-traitement ainsi les procédures expérimentales sont décrits respectivement dans les annexes C et D. Ces procédures ont été mises au point au laboratoire LISA pour le dépôt de motifs de platine et la gravure TMAH, au laboratoire MODFAB pour la gravure au XeF_2 et au laboratoire de couches minces des Technologies Novimage pour la gravure au RIE. Les améliorations apportées à ces procédures expérimentales seront décrites au chapitre 4.

3.4 Conclusions du chapitre 3

Notre microactuateur a été conçu pour pouvoir être fabriqué via un procédé standard CMOS suivi d'un post-traitement compatible CMOS. Ainsi, comparativement à la plupart des composants CMOS MEMS fabriqué avant ou après le procédé CMOS (voir section 2.2.2), le microactuateur et son circuit de contrôle sont fabriqués sur le même substrat au cours d'un seul et même procédé en utilisant le même outil de design Cadence. Pour libérer les microactuateurs du substrat, la stratégie de micro-usinage hybride que nous avons développée combine les avantages d'une gravure anisotrope du Si au TMAH suivi d'une gravure isotrope au XeF_2. Préalablement à ces étapes de gravure, le dépôt et la mise en forme d'une couche mince de platine a pour but de protéger les butées des microactuateurs contre toute attaque chimique au cours du post-traitement. Une dernière étape de gravure au RIE est prévue afin de retirer la couche de passivation du microactuateur.

CHAPITRE 4

MICRO-USINAGE DE L'ACTUATEUR: MESURES, RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Introduction

Une grande partie de ce travail de doctorat a consisté à développer et optimiser des étapes de microfabrication compatibles avec les procédés standards CMOS. Les résultats expérimentaux obtenus après chacune des séries de microfabrication ont permis d'améliorer d'une part, le design de l'actuateur et d'autre part, le procédé de fabrication et de post-traitement pour obtenir des structures complètement libérées et intactes pouvant être caractérisées et testées.

Ce chapitre débute par des mesures de caractérisation effectuées sur les échantillons reçus de la CMC afin d'obtenir plus d'information sur le procédé (les épaisseurs des couches minces et leurs modules d'Young). Plusieurs générations de microactuateurs ont été implémentées ce qui nous a permis d'améliorer leur design ainsi que le procédé de micro-usinage appliqué dont la stratégie a été présentée au chapitre 3. Nous présentons dans ce chapitre, les principaux résultats expérimentaux obtenus. Pour chaque étape effectuée en post-traitement (dépôt de motifs de platine, gravure anisotrope au TMAH, gravure isotrope au XeF_2 et gravure RIE) les résultats de microfabrication sont analysés. Les améliorations apportées au design du microactuateur et aux procédés de micro-usinage sont résumées dans ce chapitre ainsi que dans l'annexe D.

4.2 Caractérisation des couches minces du procédé standard CMOS

La technologie Mitel 1,5 µm CMOS étant un procédé commercial, peu d'informations ont été fournies concernant la composition exacte des couches minces déposées, leurs épaisseurs effectives, leurs caractéristiques mécaniques et thermiques ainsi que les techniques de dépôt et de mise en forme utilisées. Tel que mentionné précédemment, un ensemble de carrés représentant chacune des couches minces du procédé (figure 3.1) ainsi qu'une combinaison de ces couches a été incluse afin d'effectuer des mesures de caractérisation. Le tableau suivant résume les niveaux de couches minces représentés dans les carrés qui ont été disposés sur deux colonnes. La figure 4.1 montre la partie du design comportant ces carrés de couches minces ainsi que trois structures MEMS. Tandis que la figure 4.2 montre une vue en 3D résultant de la simulation du procédé à l'aide du logiciel MemsproTools™.

Tableau 4.1: Composition des carrés de couches minces du design ICBPMAT5.

couches minces	abréviation	combinaisons de couches minces
1. oxyde thermique	ACT	8. ACT-CON
2. polysilicium	P1	9. ACT-CON-M2
3. oxyde de contact	CON	10. ACT-CON-PAS
4. métal 1	M1	11. P1-M1
5. oxyde de via	VIA	12. P1-M1-M2
6. métal 2	M2	13. ACT-CON-VIA
7. passivation	PAS	14. ACT-CON-VIA-PAS

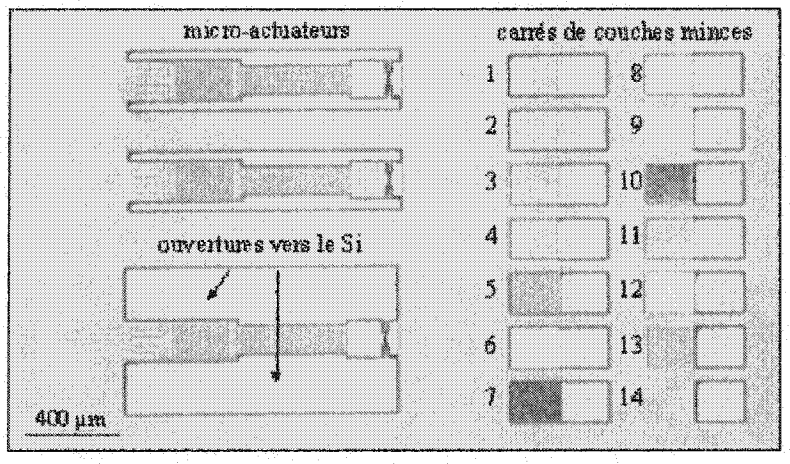


Figure 4.1: Micrographie optique d'une partie du design ICBPMAT5 comportant trois structures MEMS et des carrés de couches minces du procédé.

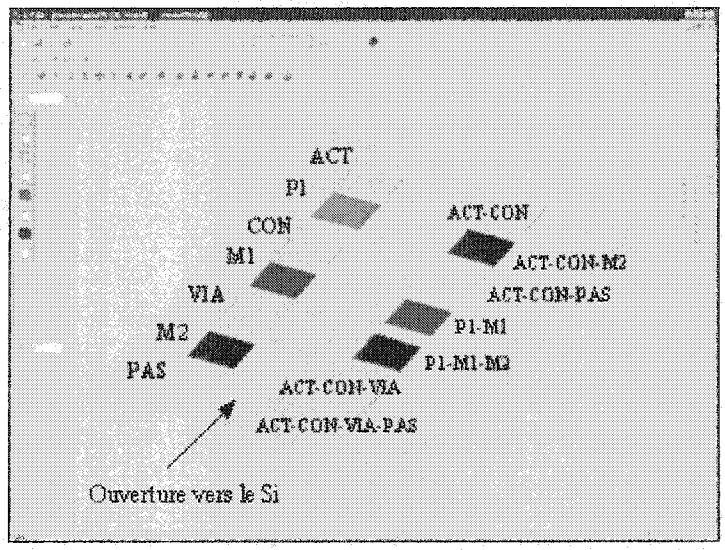


Figure 4.2: Vue en perspective des carrés de couches minces (MemsproTools) permettant d'identifier l'emplacement des couches minces et des ouvertures vers le substrat.

4.2.1 Caractérisation des épaisseurs de couches minces CMOS

Les mesures effectuées sur ces carrés de couches minces au moyen d'un profilomètre Dektak et leur analyse sont présentées dans l'annexe E. Notons que les épaisseurs mesurées pour les combinaisons de couches diélectriques sont inférieures aux additions de leurs épaisseurs nominales, suggérant que les couches minces sont surgravées lors d'étapes de gravure ayant lieu après leurs dépôts. Par ailleurs, nous pouvons également émettre l'hypothèse que les épaisseurs des couches minces entrant dans la composition des couches CON et VIA peuvent être amincies sur ces motifs carrés à cause de leur méthode de dépôt. Par exemple, nous savons que du SOG fait partie de la composition des oxydes de contact et de via. La figure 4.3 illustre la possibilité de non-uniformité de la couche SOG (spin-on-glass) sur les carrés de couches minces de 200 µm par 200 µm. La méthode de dépôt de cette couche peut certainement produire des variations d'épaisseur sur la surface supérieure du carré suivant le nombre de couches minces déjà présentes. Au contraire les couches de passivation, métalliques et de polysilicium sont caractérisées par des épaisseurs supérieures à leurs valeurs nominales. La variation de l'épaisseur de la couche de passivation a particulièrement été observée au cours de différentes séries de fabrication, ce qui suggère que le procédé de fabrication CMOS a modifié ses spécifications au cours des années.

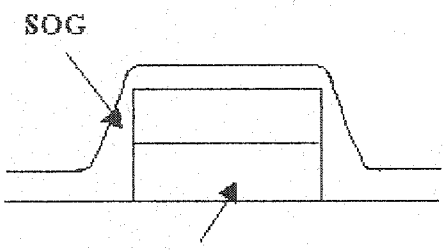


Figure 4.3: Recouvrement d'un carré de couche minces par une couche de SOG (dessin non à l'échelle).

Tableau 4.2: Mesures profilométriques sur les carrés de couches minces du design ICBPMAT5 et comparaison des épaisseurs nominales et estimées de ces couches.

couche mince	épaisseur nominale (µm)	épaisseur mesurée (µm)	combinaison de couches minces	épaisseur nominale (µm)	épaisseur estimée (µm)	mesure au profilomètre (µm)
PAS	1	1,5	ACT-CON-VIA-PAS	3,5	4,8	4,4
M2	0,8	1,2	ACT-CON-VIA	2,5	2,1	1,7
VIA	0,8	0,7	ACT-CON	1,7	1,2	0,8
M1	0,8	1				
CON	0,8	0,6	P1-M1-M2	1,9		3,0
P1	0,3	0,4	P1-M1	1,1		1,4
ACT	0,9					

Ces mesures sur les carrés de couches minces montrent que les couches d'oxyde ACT, CON et VIA ont des épaisseurs inférieures à leurs épaisseurs nominales. Nous avons suggéré que ces couches minces puissent être surgravées lors d'étapes de gravures subséquentes et que les méthodes de dépôt utilisées peuvent être la cause de couches minces d'épaisseur variable sur les motifs carrés de 200 µm par 200 µm. A contraire les couches P1, M1, M2 et PAS ont des épaisseurs supérieures à celles attendues. L'épaisseur de la couche PAS est supérieure de 52 % par rapport à sa valeur nominale suggérant que l'épaisseur de la dernière couche mince du procédé est peu contrôlée ou a été augmentée. Compte tenu de ces résultats, nous émettons l'hypothèse que le procédé de fabrication a pu évoluer au cours des années par rapport aux informations divulguées en 1995 [80].

4.2.2 Caractérisation des épaisseurs de couches minces du microactuateur

Les mesures effectuées sur les carrés de couches minces du design ICBPMAT5 ont montré que certaines couches minces (en particulier les oxydes) ont été gravées lors des étapes de microfabrication ayant eu lieu après leur dépôt et que les dimensions des carrés peuvent également être la cause de la diminution de leurs épaisseurs. La déflexion initiale de la poutre et son comportement électromécanique sont fortement influencées par l'épaisseur de ces couches minces. Il est donc primordial de mesurer les épaisseurs effectives des couches minces entrant dans la composition du microactuateur.

La figure 4.4 montre une micrographie optique d'une structure en porte-à-faux du design ICBPMAT5 ayant de grandes ouvertures vers le silicium de chaque côté et un schéma identifiant les différentes parties de la poutre. L'axe C1 représente la direction d'une coupe transversale sur la partie B de l'actuateur pour mesurer les différentes épaisseurs des couches composant la structure. Tandis que l'axe C2 correspond à une coupe longitudinale sur les parties C et C' de l'actuateur et la partie D de la butée afin de déterminer les épaisseurs des couches situées entre l'extrémité de la poutre et la butée et de celles composant la butée. Étant donné les dimensions des structures, des clivages effectués manuellement au moyen d'une pointe en diamant sont difficiles et surtout très imprécis. Des microsections par FIB (focused ion beam) et des observations au microscope électronique à balayage confocal (FESEM, field emission scanning electron microscope) ont été effectuées au Laboratoire microsystèmes du département "Analyses Électroniques" du Centre national d'études spatiales (CNES) de Toulouse. Les figures 4.5 et 4.6 présentent les micrographies électroniques à balayage obtenues en observant respectivement les coupes transversales C1 et longitudinale C2.

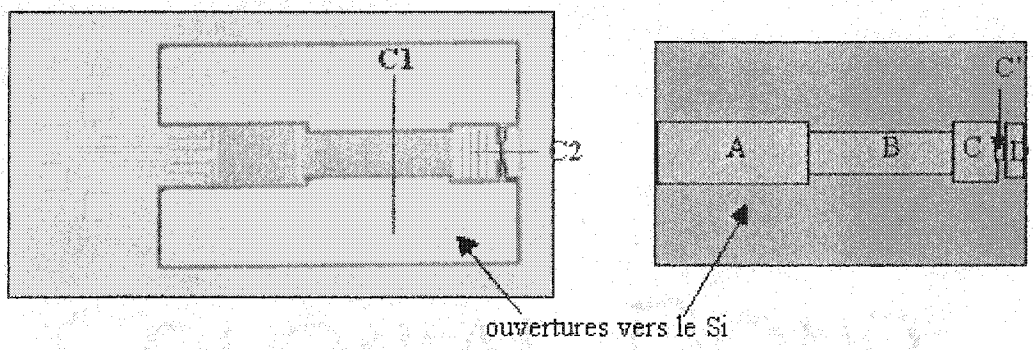


Figure 4.4: Micrographie optique et représentation schématique d'un microactuateur indiquant les directions respectives C1 et C2 des coupes transversale et longitudinale.

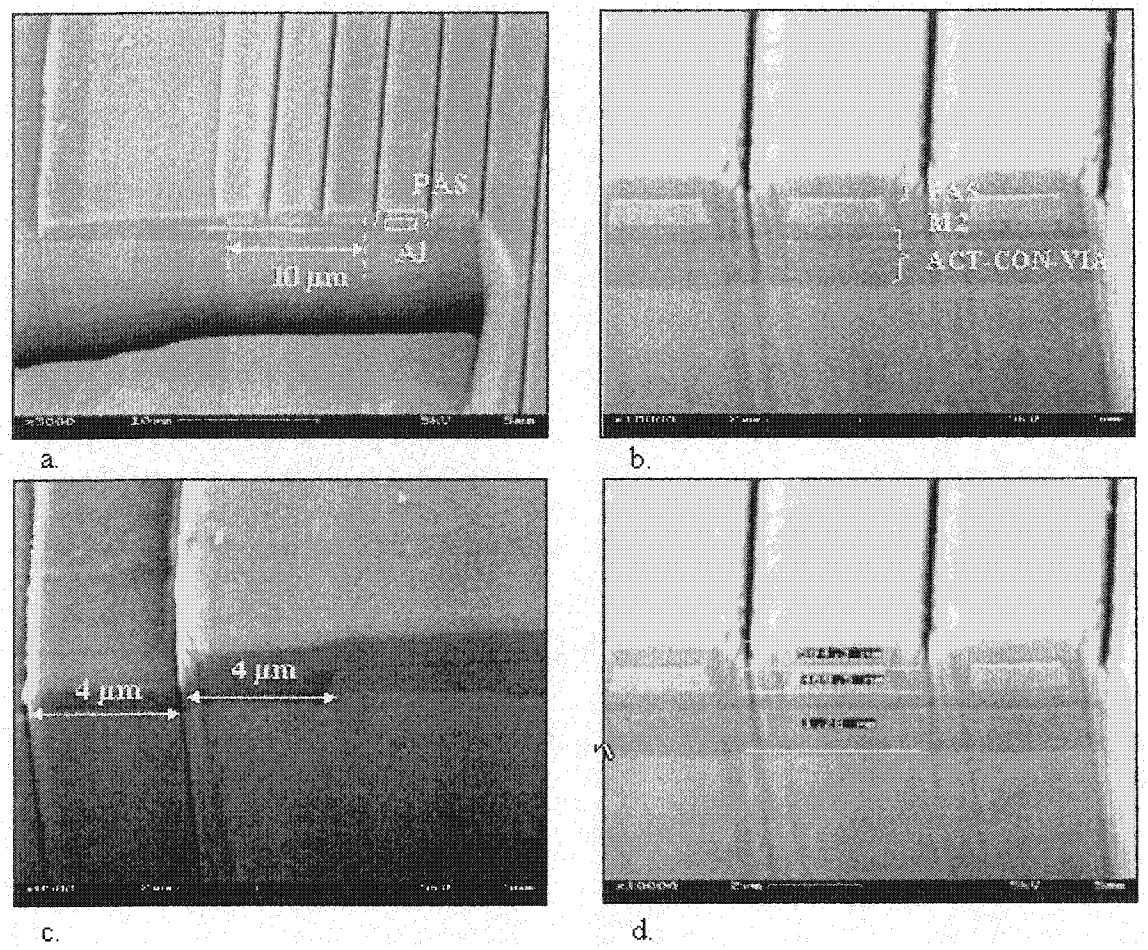


Figure 4.5: Coupe transversale C1 au FIB: a) vue générale b) agrandissement sur les lignes d'Al c) agrandissement un bord de la structure d) mesures des épaisseurs de couches minces du microactuateur.

Une vue générale de la microsection C1 (figure 4.5-a) permet d'observer au niveau du bilame B, les lignes d'aluminium de 2 µm de largeur et espacées de 2 µm ainsi que leur encapsulation dans la couche de passivation. Nous pouvons aussi observer sur la figure 4.5-b, que les parois de chaque ligne d'aluminium ne sont pas parfaitement verticales mais légèrement inclinées. Au-dessous de la couche métallique M2, se situe l'empilement des couches d'oxydes ACT-CON-VIA. Tandis qu'au-dessus de la couche de métal, la couche de passivation (composée d'une couche d'oxyde recouverte par une couche de nitrure de silicium) apparaît avec une forme arrondie résultant de l'utilisation de la technique FIB. La figure 4.5-c montre un bord de la structure où il est possible de distinguer l'empilement des différentes couches d'oxyde qui ont été

dessinées avec un chevauchement de 4 µm. Sur la figure 4.5-d, les épaisseurs mesurées sur l'image prise au FESEM doivent être multipliées approximativement par 2 pour obtenir les épaisseurs réelles. La triple couche d'oxyde ACT-CON-VIA est caractérisée par une épaisseur de 2,56 µm ce qui correspond bien à l'épaisseur nominale de 2,5 µm compte tenu de l'incertitude de 8% sur les mesures prises au FESEM. La couche d'aluminium a une épaisseur de 0,98 µm, ce qui correspond à l'épaisseur mesurée de 1 µm sur le carré de couche M2. Par conséquent, l'épaisseur nominale de 0,8 µm de la couche M2 correspond plutôt à sa valeur minimale. Concernant la couche de passivation, la mesure indiquée sur la figure 4.5-d, de l'ordre de 1,2 µm, correspond seulement à une partie de cette double couche. En tenant compte de la partie supérieure arrondie, l'épaisseur totale est de ~ 1,7-1,9 µm ce qui est particulièrement élevée puisque la valeur nominale est de 1 µm et l'épaisseur du carré de PAS est de 1,52 µm. Le profil obtenu avec le FIB a tendance à arrondir la partie supérieure de la couche PAS et augmente ainsi l'incertitude sur la mesure au FESEM.

La coupe longitudinale C2 (figure 4.6-a) permet de déterminer les épaisseurs des couches minces du pad court-circuiteur et de la butée. La figure 4.6-b est un agrandissement au niveau de l'extrémité du pad court-circuiteur où il est possible de distinguer une partie d'une de ses lignes de métal d'une épaisseur de 0,90 µm. Au-dessus de cette couche M2 se situe la couche PAS dont l'épaisseur totale est ~ 1,7-1,9 µm, tandis que la triple couche ACT-CON-VIA se caractérise par une épaisseur de 2,34 µm. Ces mesures d'épaisseurs sont de l'ordre de grandeur de celles caractérisées en utilisant la microsection C1. La figure 4.6-c montre les couches minces situées entre l'extrémité de la poutre et la butée. Les couches métalliques M1 et M2 présentent des résultats similaires à la figure 4.5-b avec une épaisseur de ~ 0,90 µm. Cette figure 4.6-c met en évidence le fait que la couche PAS n'a pas été gravée de manière à laisser une ouverture vers la couche M1 (problème mis en évidence au chapitre 4). La figure 4.6-d montre l'empilement des couches minces de la butée ainsi qu'une partie de la couche sacrificielle M1. Le tableau 4.3 récapitule les mesures effectuées selon les coupes transversales C1 et C2.

Tableau 4.3: Épaisseurs des couches minces du microactuateur estimées au FESEM.

	ACT-CON-VIA	M1 / M2	PAS
coupe transversale C1	~ 2,5 µm	~ 1µm	~ 1,7 µm
coupe transversale C2	~ 2,3 µm	~ 0,9 µm	~ 1,7 µm

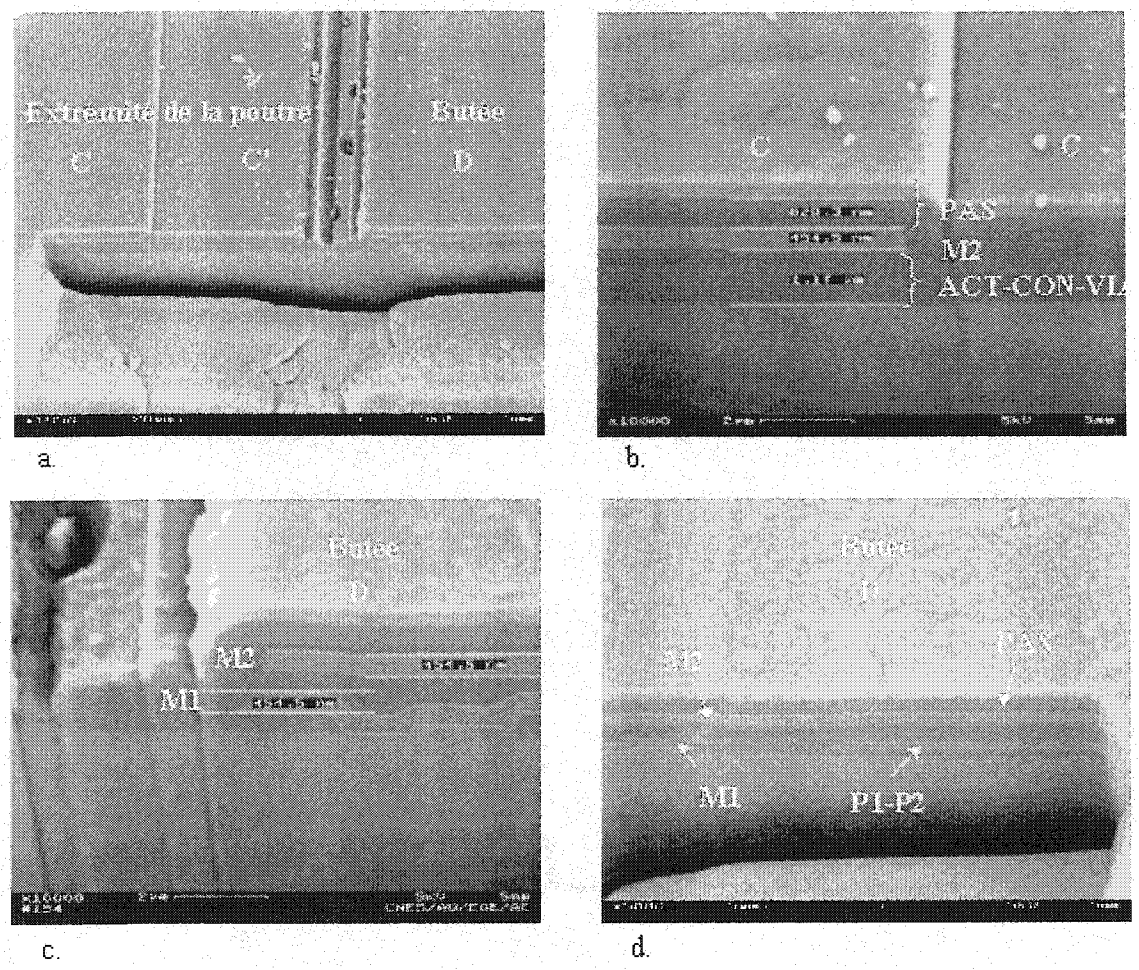


Figure 4.6: Coupe transversale C2 au FIB: a) vue générale b) agrandissement au niveau du pad court-circuiteur c) agrandissement entre l'extrémité de la poutre et la butée d) couches minces de la butée.

4.2.3 Évaluation des modules d'Young des couches minces de l'actuateur

Des mesures par nano-indentation sur des carrés de couches minces ont été réalisées afin de déterminer les modules d'Young des matériaux du microactuateur. Les carrés correspondant aux couches ACT, CON, VIA et M2 n'ont pas permis de déterminer les modules d'Young de ces matériaux (voir analyse de ces mesures à l'annexe F). Par contre, les mesures effectuées sur la couche PAS (dernière couche du procédé qui ne subit pas de surgravures subséquentes, donne un module d'Young d'environ 135 GPa ce qui correspond à l'ordre de grandeur du module d'Young d'une couche de nitrure de silicium [74].

4.3 Étape 1: dépôt de motifs de platine par pulvérisation et lift-off

4.3.1 Motifs de platine déposés sur les actuateurs

Le platine déposé par pulvérisation et mis en forme par lift off recouvre, pour la majorité des structures, la butée seulement. Cette étape a lieu après le dépôt de toutes les couches du procédé standard CMOS. L'étape de photolithographie est critique du fait de l'alignement nécessaire sur un ensemble de couches minces ayant une épaisseur totale de l'ordre de 4-5 µm. Plusieurs croix d'alignement ont été incluses dans le masque afin d'améliorer la précision de l'alignement. Le résultat est présenté à la figure 4.7. On distingue la couche brillante et blanche du platine qui adhère parfaitement à la butée.

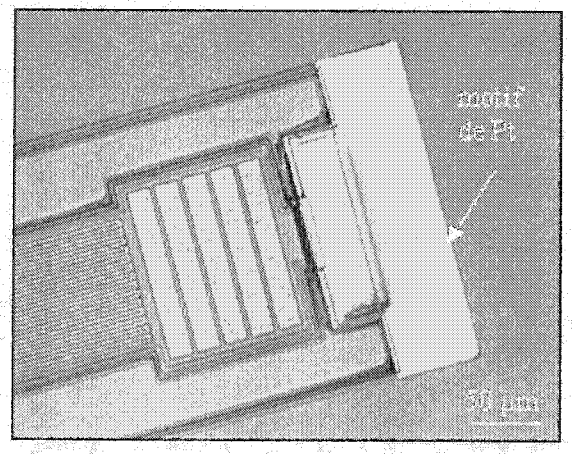


Figure 4.7: Recouvrement de la butée de la structure MEMS par une couche mince de platine déposée par pulvérisation.

4.3.2 Optimisation de la procédure de dépôt et de lift-off du platine

Le dépôt des motifs de platine (service Can-MEMS) utilise une procédure de photolithographie standard avec une résine positive photosensible (HPR 504) suivi du dépôt par pulvérisation de Ti/Pt (Ti pour l'adhésion) et de la technique du lift-off. La procédure de lift-off utilisée en immergeant dans un bain d'acétone l'échantillon recouvert de platine est cependant longue et imparfaite. En effet, des jets d'acétone (au moyen d'un gicleur) sont nécessaires pour réussir à retirer les morceaux de platine aux endroits non désirés. Cette technique de lift-off a donc été remplacée par un procédé de lithographie bi-couche utilisant deux résines différentes: la résine positive HPR 504 en combinaison avec la résine LOR 10A.

donc été remplacée par un procédé de lithographie bi-couche utilisant deux résines différentes: la résine positive HPR 504 en combinaison avec la résine LOR 10A.

La figure 4.8 illustre les étapes de photolithographie bi-couche, de pulvérisation et de lift-off du platine. La résine HPR 504 sert de masque pour la résine LOR 10A qui est gravée de façon isotrope dans le développeur L26W. Le profil de la résine LOR assure donc une discontinuité dans la couche de platine permettant ainsi un décollement plus facile. La procédure initiale (Can-MEMS) qui utilisait uniquement la couche de résine positive HPR 504 pouvait prendre jusqu'à 60 min pour l'étape de lift-off dans un bain d'acétone. Tandis que l'addition de cette résine LOR 10A a réduit le temps à 5-10 min en facilitant le retrait de la résine de la surface de l'échantillon et en laissant uniquement les motifs de platine désirés. Ce procédé a permis de mener à bien une étape critique de la microfabrication et apporte, pour une complexité limitée, un gain en reproductibilité et en temps de réalisation ainsi qu'une réduction de défectuosité.

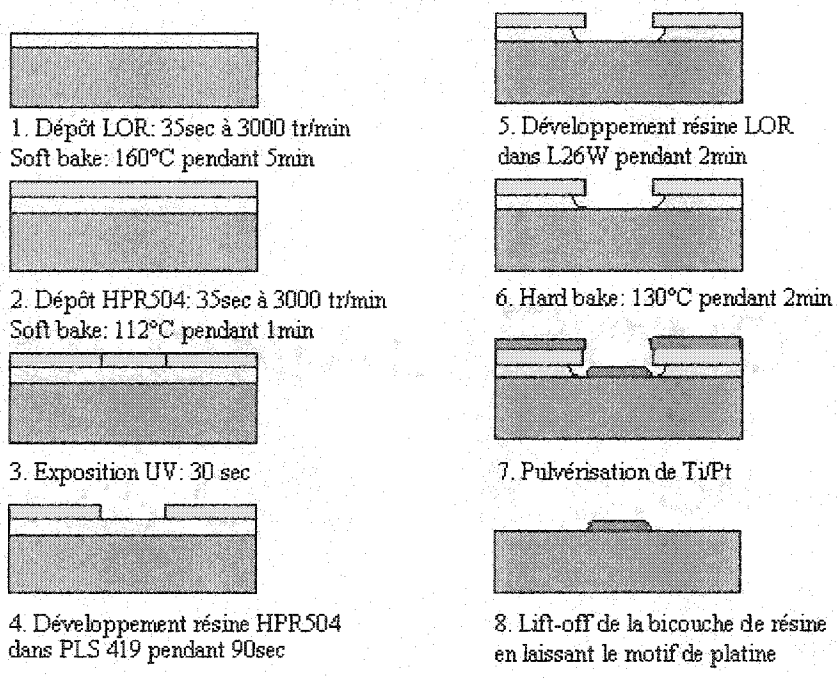


Figure 4.8: Procédé de dépôt et de mise en forme de platine par pulvérisation et lift-off au moyen d'une technique de lithographie bi-couche.

La figure 4.9 montre, sur une partie du design ICBPMAT5, les motifs obtenus après développement de la résine HPR 504 (a), puis de la résine sous-jacente LOR 10A (b). Une mesure au profilomètre Dektak donne une épaisseur de résine totale de l'ordre de 3,2 µm. Les couches de Ti/Pt (100Å/2000Å) sont ensuite déposées dans un pulvérisateur magnétron. La même figure montre l'échantillon ICBPMAT5 lorsque toute la surface de l'échantillon est recouverte de platine (c) puis lorsque les deux résines (LOR 10A et HPR 504) ont été retirées (d) On peut alors distinguer le platine par sa brillance et sa couleur blanche sur les butées, en dessous des carrés de couches du procédé Mitel et sur les croix d'alignement. Les expériences de gravure dans le TMAH, le XeF_2 et le CF_4 montreront dans les sections suivantes que le platine résiste à ces attaques chimiques et protège parfaitement bien la couche de passivation.

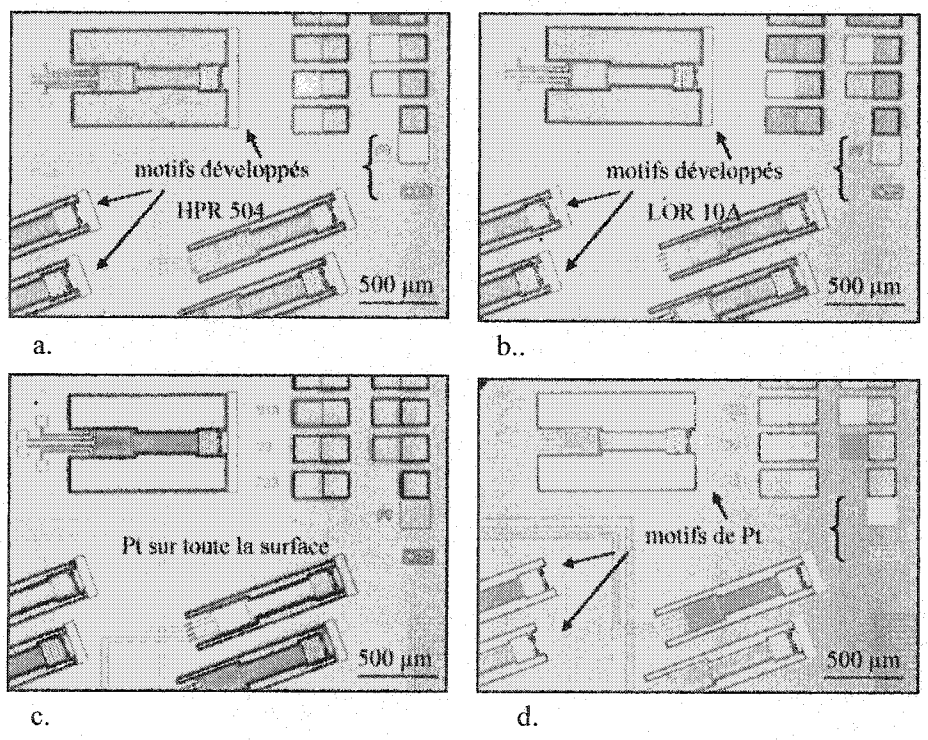


Figure 4.9: Dépôt et mise en forme d'une couche mince de platine a) motifs (résine HPR 504) b) motifs (LOR10A) c) pulvérisation de platine d) motifs de Pt obtenus par lift-off.

4.4 Étape 2: Gravure anisotrope du silicium au TMAH

4.4.1 Gravure anisotrope du silicium

Gravure du plan cristallin (100) du substrat de silicium:

Les échantillons fabriqués avec la technologie Mitel 1,5 µm CMOS contiennent des ouvertures au travers de toutes les couches d'oxydes et de passivation pour permettre un accès direct vers le substrat de silicium de type (100). Ce plan (100) correspond au fond plat des cavités micro-usinées par le TMAH. Dans une solution de TMAH 25%wt à 90°C, le taux de gravure du plan (100) est en moyenne de 45 µm/hr. Ce taux de gravure est obtenu en mesurant au profilomètre Dektak la profondeur d'une cavité micro-usinée avec une précision de ± 0,1 µm et en chronométrant le temps d'immersion de l'échantillon dans la solution de TMAH. Une mesure de la profondeur de la cavité au moyen d'un microscope optique, doté d'un micromètre digital comporte une incertitude de mesure de ± 0,5 µm. Pour une température de 85°C, le taux de gravure du silicium est réduit à 30 µm/hr. La gravure du silicium dans le TMAH dépend de la température [84].

On observe également que le plan (100) présente différents aspects au fur et à mesure de la gravure. En effet, durant la première heure de gravure, de grands trous à fond plat apparaissent. Le substrat a subi le procédé standard CMOS avant d'être exposé au TMAH. De ce fait, sa surface n'est pas parfaitement plane au départ. Toutefois, il est possible d'observer au microscope optique que la solution de TMAH finit par aplanir la surface en élargissant petit à petit ces trous jusqu'à ce qu'ils se rejoignent pour donner un fond plat et lisse. La figure 4.10 montre la gravure du plan (100) pour une structure en porte-à-faux dessinée avec de grandes ouvertures vers le silicium sur les côtés. On constate que le fond de la cavité s'aplanit de plus au cours de la gravure au TMAH. Le contour de la cavité apparaît de plus en plus noir dû au fait de l'apparition progressive des plans inclinés {111} au fur et à mesure que le plan (100) est gravé. Il est possible d'observer, de chaque côté de la structure, la progression des plans rapidement gravés qui sont inclinés par rapport à la surface de l'échantillon. La partie du microactuateur correspondant au pad court-circuiteur apparaît également noir sur la figure 4.10-d car le silicium sous-jacent a déjà été gravé.

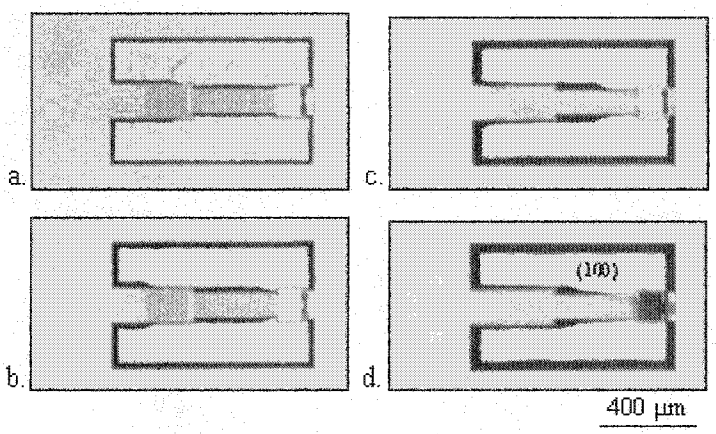


Figure 4.10: Micrographies optiques d'une structure en porte-à-faux après une gravure au TMAH 25% wt. à 90°C de a) 30 min b) 60 min c) 90 min et d) 120 min.

Les plans cristallins {111} du silicium obtenus au TMAH:

Selon la structure cristallographique du Si, les plans {111} ont un angle d'inclinaison θ = 54,74° par rapport aux plans {100}. La figure 4.11 montre que les plans {111}, qui apparaissent au fur et à mesure que le plan (100) se fait graver par la solution de TMAH, ont effectivement cet angle d'inclinaison θ. Ceci montre que le TMAH grave bien de façon anisotrope le substrat de silicium et que les plans {111} ne sont que très lentement gravés. Sur la figure 4.10, ces plans {111} apparaissaient progressivement sur le pourtour de la cavité du fait de leur inclinaison par rapport au plan du substrat. Les intersections des plans {111} avec la surface (100) correspondent aux bords dessinés des cavités et des microactuateurs indiquant que les structures en porte-à-faux sont bien alignées avec la direction <110> du méplat de la gaufre [86].

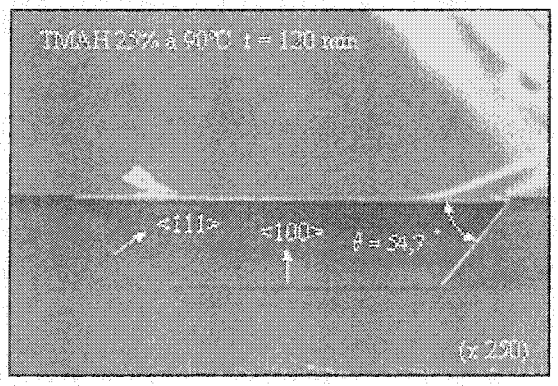


Figure 4.11: Micrographie MEB (vue de côté) d'une cavité micro-usinée dans un substrat (100).

4.4.2 Couches minces du procédé standard CMOS exposées au TMAH

Le comportement des couches minces du procédé standard CMOS dans une solution de TMAH est observé d'une part sur les carrés témoins et d'autre part au niveau des structures MEMS elles-mêmes. La figure 4.12 montre les carrés de couches minces du procédé Mitel avant et après une gravure de 1 h au TMAH à 85°C. Une observation au microscope optique montre que les couches d'oxyde thermique, de contact et de via ont disparues ainsi que les couches métalliques et de polysilicium. Seuls les couches minces des carrés comportant la couche de passivation de Mitel (PAS, ACT-CON-PAS et ACT-CON-VIA-PAS) sont encore présentes. La triple couche d'oxyde (ACT-CON-VIA) montre un changement de couleur au microscope optique, ce qui suggère que la dernière couche d'oxyde de via a été un peu gravée dans la solution de TMAH. De la même façon, la triple couche composée de polysilicium 1 et des couches métalliques apparaît avec une couleur différente de celle observée avant la gravure au TMAH. Ceci suggère qu'au moins une des couches métalliques a été gravée. La carré de platine, déposé en post-traitement, apparaît parfaitement après cette gravure.

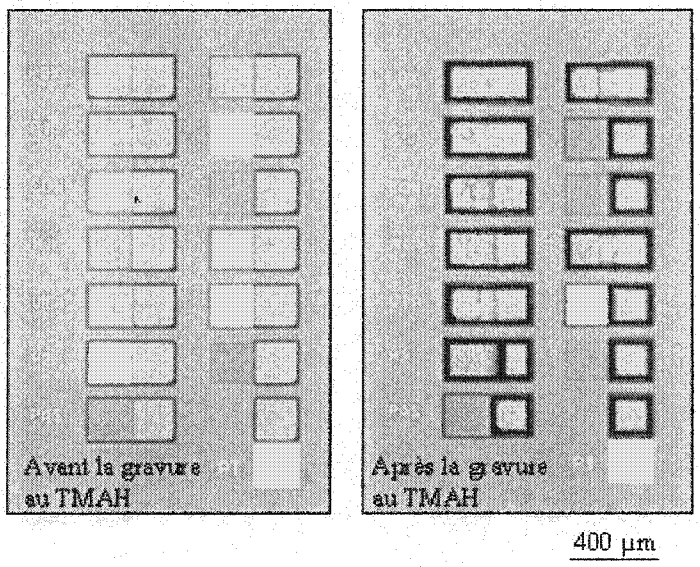


Figure 4.12: Carrés de couches Mitel 1,5 µm CMOS avant et après une gravure au TMAH 25% wt. à 85°C.

Les mesures prises avec le profilomètre Dektak sur les carrés de couches minces, après une gravure au TMAH sont présentées dans l'annexe E. Ces mesures montrent que les carrés contenant une seule couche du procédé (à l'exception de la couche de passivation) ont disparus

puisque l'on détermine un taux de gravure ~ 29 µm/hr correspondant approximativement à celui du substrat. Les carrés composés d'une triple couche semblent mieux résister face à une gravure au TMAH de 1 h. L'analyse des mesures profilométriques sur les carrés de couches minces après une gravure au TMAH est présentée plus en détail dans l'annexe E.

Nous avons émis l'hypothèse précédemment que la technologie Mitel 1,5 µm CMOS a évolué au cours des années, ce qui expliquerait les résultats expérimentaux différents obtenus d'une série de fabrication à une autre. En effet, la dernière couche de passivation du procédé Mitel a donné des résultats très différents pour la première étape de gravure au TMAH. Pour certaines séries de fabrication, la couche de passivation protégeait très peu les structures MEMS ou les pads puisque, après seulement une heure de gravure, on pouvait distinguer que les lignes métalliques "protégées" par la couche de passivation, avaient été gravées. La figure 4.13 du design ICBPMET4 montre la gravure de la seconde couche d'aluminium à différents endroits: au niveau des bilames, des pads de contact sur le pourtour du dé et du système d'adressage microélectronique. Au bout d'une heure de gravure, la couche de passivation fait défaut et laisse le TMAH attaquer la seconde couche de métal. En utilisant, uniquement une gravure anisotrope du silicium, de grandes structures telles que celles présentées sur la figure 4.13 ne peuvent donc pas être libérées du substrat sans être considérablement endommagées. Ainsi, pour palier à ce problème causé par la faiblesse de la couche de passivation, l'utilisation de couches de passivation additionnelles du service Can-MEMS a permis d'augmenter la protection des lignes de métal constituant les bilames.

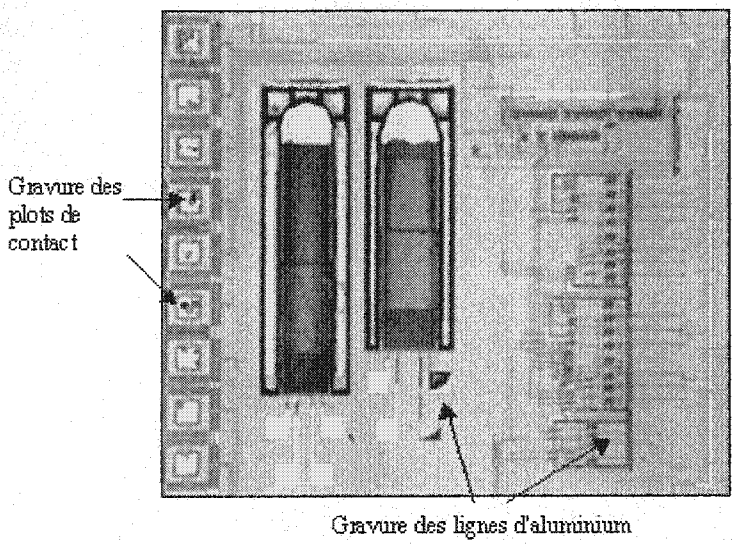


Figure 4.13: Design ICBPMET4 ayant subi une gravure au TMAH 25% wt. à 80°C pendant 2 h.

Cependant, les pads de contact ont montré une résistance encore plus faible face à la solution de TMAH. L'application d'une couche mince de résine négative a été nécessaire pour protéger les pads de la solution de TMAH. Compte tenu des problèmes causés par le comportement de la couche de passivation dans la solution de TMAH, la stratégie de micro-usinage a été modifiée de façon à réduire le temps de gravure dans le TMAH et à utiliser une étape de gravure subséquente permettant de libérer complètement la structure sans endommager les lignes de métal. Une couche mince de platine a également été ajoutée sur toutes les surfaces de certaines structures pour assurer la protection des bilames. Le dernier design ICBPMAT5 soumis à la série de fabrication Mitel a donné des échantillons dont la couche de passivation résistait parfaitement après 2 h de gravure au TMAH. L'étape de dépôt de résine négative n'a donc pas été nécessaire. Cependant, on a observé pour cette dernière série de fabrication, que la couche de passivation n'a pas été complètement ouverte à l'interstice situé entre l'extrémité de la structure en porte-à-faux et la butée. Cela a pour conséquence de ralentir la gravure du silicium puisque le TMAH ne peut pas graver directement à partir de l'extrémité de la poutre mais uniquement par les ouvertures sur le côté.

4.4.3 Optimisation du design de l'actuateur pour la gravure au TMAH

Le design du micro-actuateur consiste en une structure en porte-à-faux, composée de deux bilames et d'un pad court-circuiteur, et d'une butée en dessous de laquelle l'extrémité de la poutre reste coincée à l'état OFF du système. Dans le cas simplifié d'une structure en porte-à-faux composée d'oxyde de silicium, sa libération par gravure du substrat situé en dessous, s'effectue à partir de l'extrémité libre de la poutre. En effet, du fait de la présence de coins convexes, des plans ayant un taux de gravure plus élevé que le plan (100) apparaissent sous la structure. Ces plans rapidement gravés sont caractérisés par un angle de déviation $\alpha = 22°$ par rapport à la direction du méplat <110> dans le plan du substrat [87,88]. Connaissant le taux de sous-gravure de ces plans rapidement gravés ainsi que les dimensions de la structure en porte-à-faux, il est possible de déterminer le temps de gravure nécessaire pour libérer complètement la structure du substrat. La figure 4.14 montre, pour une structure en porte-à-faux de longueur (L) et de largeur (W), l'évolution durant la gravure des plans ayant un angle de déviation de $\alpha = 22°$ par rapport aux directions <110> durant la gravure.

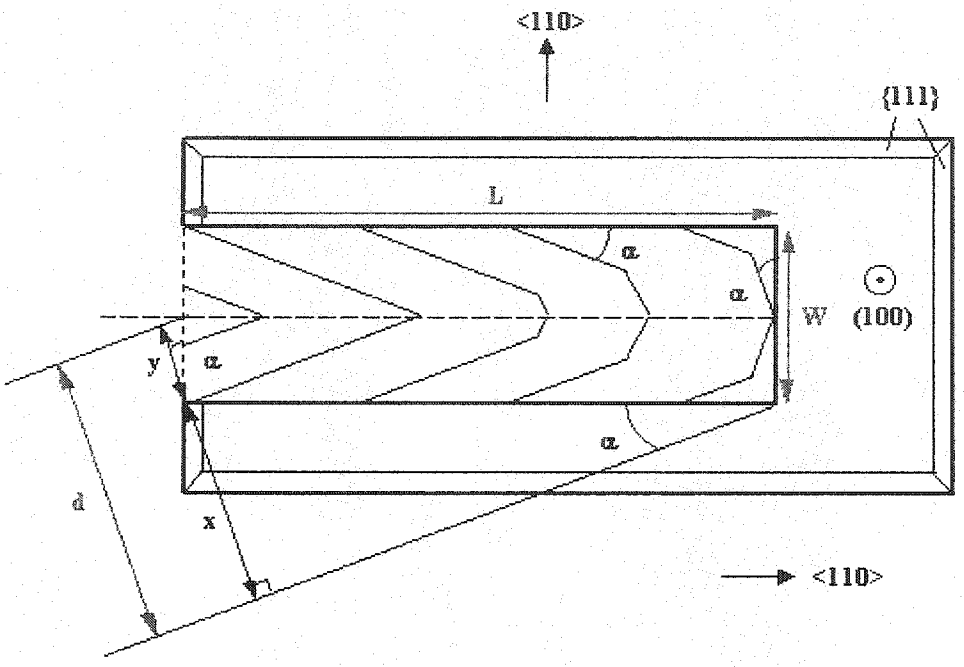


Figure 4.14: Schéma des plans rapidement gravés sous une structure en porte-à-faux alignée avec la direction <110> du méplat.

Pour libérer complètement la structure en porte-à-faux du substrat, les plans rapidement gravés doivent parcourir la distance de gravure d indiquée sur la figure 4.14. La géométrie permet d'établir la relation suivante:

$$d = \frac{W}{2}\cos\alpha + L\sin\alpha \tag{4.1}$$

Par conséquent, le temps de gravure minimum t requis pour compléter la libération de la structure en porte-à-faux est de:

$$t = \frac{d}{UER_{(525)}} \tag{4.2}$$

où $UER_{(525)}$ est le taux de sous-gravure des plans les plus rapidement gravés sous le masque d'oxyde de silicium. Par exemple, pour une solution de TMAH 25% à 85°C, le taux de sous-gravure des plans rapidement gravés (UER) est de l'ordre de 52 µm/hr. La figure 4.15 montre, pour un substrat de silicium gravé de façon anisotrope, les définitions des taux de gravure ER (etch rate) et de sous-gravure sous un masque UER (under-etch rate).

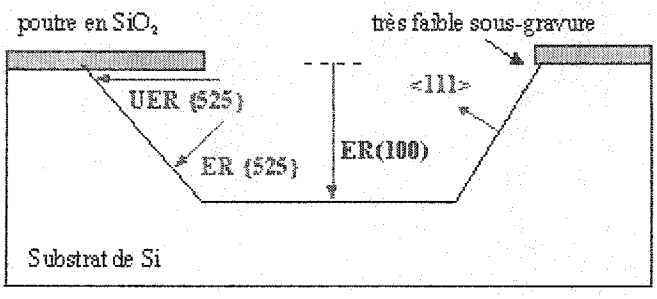


Figure 4.15: Définition des taux de gravure et de sous-gravure sous un masque de SiO_2 dans un substrat de Si après une gravure anisotrope.

La libération d'une structure en porte-à-faux par gravure anisotrope du substrat de silicium montre que plusieurs types de plans ayant des taux de gravure élevés par rapport au plan (100) apparaissent aux coins convexes. Ces plans ont un angle d'inclinaison pouvant varier entre 45° et 54,7°. Ainsi les plans de type {331}, {212} et {525}, ayant respectivement un angle d'inclinaison θ de 46,5°, 48,2° et 47,1°, peuvent constituer les plans sous-gravés dans la solution de TMAH. D'autre part, aux coins convexes du masque d'oxyde de silicium, ce sont des plans {111} qui apparaissent à l'intersection des plans {001}. Ainsi, lorsque les plans ayant les taux de gravure les plus élevés atteignent la partie attachée de la poutre, ceux-ci disparaissent progressivement du fait de la présence de plans {111} qui sont gravés très lentement.

En prenant les dimensions les plus grandes pour une structure en porte-à-faux alignée suivant la direction <110> du design ICBPMAT5, soit une longueur totale L ≅ 1040 μm et une largeur W ≅ 186 μm, une estimation du temps nécessaire pour libérer la structure du substrat dans une solution de TMAH de 25% à 85°C en utilisant l'équation 4.2 est de 9,4 h. Il s'agit donc d'une longue gravure, ce qui limite les chances que les structures puissent se dégager du substrat en restant intactes. Les résultats de gravure sur les premières séries d'échantillons ont montré que les structures ne pouvaient pas être libérées de cette façon sans être endommagées car la couche de passivation n'est pas suffisante pour protéger les lignes de métal durant de longues gravures au TMAH. Par conséquent, le design du micro-actuateur a été modifié de façon à accélérer la gravure du silicium sous-jacent.

Le design du microactuateur a été optimisé en maximisant d'une part le nombre de coins convexes et en orientant l'ensemble de la structure avec un angle de déviation de $\alpha = 22°$ par rapport à la direction du méplat. En effet, à partir du design ICBPMET6, les structures en porte-à-faux ont été dessinées en augmentant le nombre de coins convexes tel qu'illustré sur la figure 4.16 afin d'atteindre plusieurs plans ayant un taux de gravure élevé. De cette façon, les bilames A et B ne reposent plus sur une poutre de même largeur, mais sur une portion plus étroite au niveau du bilame B. Les structures sont également dessinées de manière à être plus étroites et moins longues afin de réduire le temps de micro-usinage.

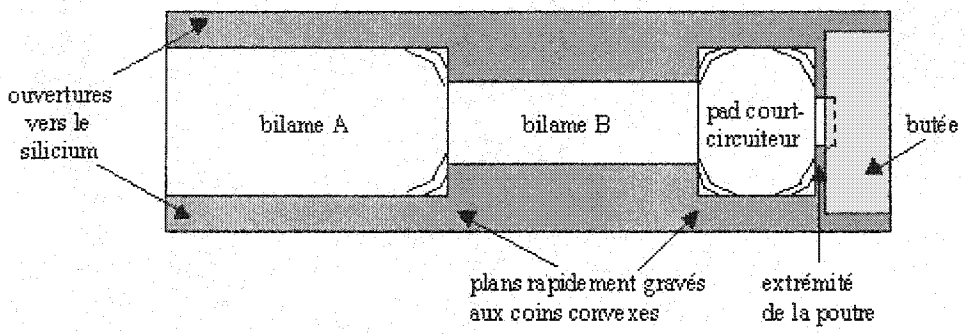


Figure 4.16: Conception de la structure en porte-à-faux avec plusieurs coins convexes pour atteindre les plans ayant un taux de gravure élevé dans le TMAH.

La figure 4.17 montre pour une structure en porte-à-faux de longueur L et de largeur W avec un angle de déviation de $\alpha = 22°$ par rapport à la direction <110>. Les plans rapidement gravés sont dessinés après avoir parcouru une distance intermédiaire di. Au fur et à mesure que ces plans vont être gravés dans le temps, les plans lentement gravés {111} vont apparaître au niveau des coins concaves du masque dessinés pour réaliser cette structure en porte-à-faux. La distance d_1 indiquée sur cette figure, montre la distance que doit parcourir le plan rapidement gravé (situé à y = 0 au début de la gravure) pour que la structure en porte-à-faux soit libérée presque sur toute sa longueur. En effet, une portion de silicium, ayant la forme d'un triangle rectangle retient encore la structure au substrat de silicium. Or la rencontre de ces plans forme à nouveau un coin convexe. Par conséquent, des plans rapidement gravés vont à nouveau apparaître sous cette structure. Ainsi la distance d_2 indiquée sur cette figure, montre la distance que doit parcourir le plan rapidement gravé qui va progresser vers la ligne x = 0.

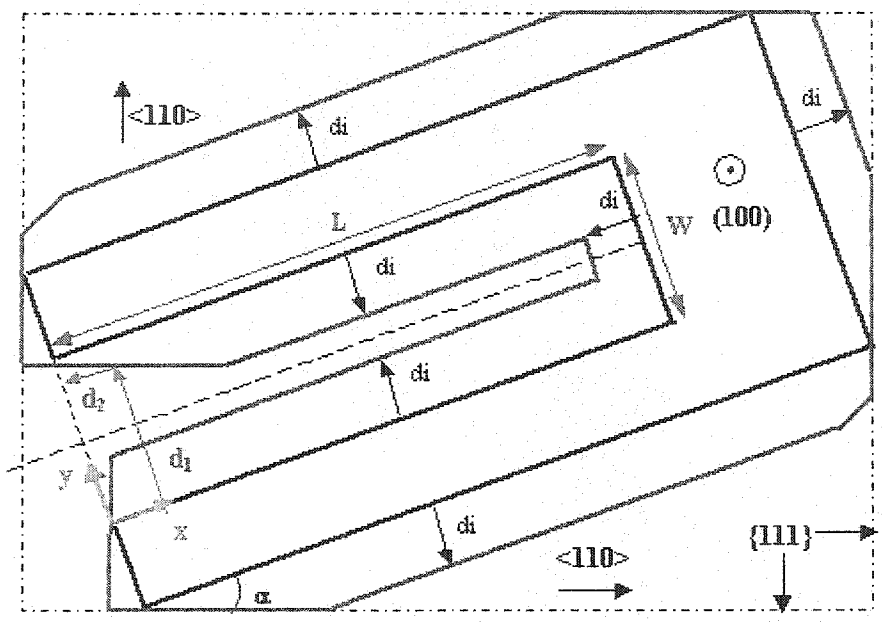


Figure 4.17: Schéma des plans rapidement gravés sous une structure en porte-à-faux orientée avec un angle de déviation de $\alpha = 22°$ par rapport à la direction <110>.

Ainsi pour libérer complètement la structure en porte-à-faux du substrat de silicium, les plans rapidement gravés doivent parcourir les distances de gravure d1 et d2 indiquée sur la figure 4.17. La géométrie permet d'établir les relations suivantes:

$$d_1 = W \cos^2 \alpha \tag{4.3}$$

et $$d_2 = W \cos \alpha \sin \alpha \tag{4.4}$$

Par conséquent, le temps de gravure minimum t requis pour compléter la libération de la structure en porte-à-faux est de:

$$t = \frac{d}{UER_{(525)}} \tag{4.5}$$

avec $$d = d_1 + d_2 \tag{4.6}$$

Dans le cas de la structure en porte-à-faux du design ICBPMAT5, de longueur $L \cong 1040$ µm et de largeur maximale $W \cong 186$ µm, une estimation du temps nécessaire pour libérer la structure du substrat de silicium dans une solution de TMAH de 25% à 85°C en utilisant l'équation 4.5 est de 4,3 h. Dans le cas de la structure alignée avec la direction du méplat de la gaufre, un temps de gravure de 9,4 h a été calculé précédemment. Ceci démontre l'avantage d'utiliser des plans

rapidement gravés sur chaque côté de la structure en orientant le microactuateur avec un angle de déviation $\alpha = 22°$ par rapport à la direction <110>.

Ainsi, en augmentant d'une part le nombre de coins convexes sur la structure en porte-à-faux et en orientant l'ensemble du microactuateur avec un angle de déviation $\alpha = 22°$, l'étape de micro-usinage au TMAH est optimisée. En effet, la couche de passivation sur les pads de contact est particulièrement vulnérable face à cette gravure au TMAH. Par conséquent, en effectuant une gravure d'environ 1 h seulement, on est assuré de ne pas graver les lignes métalliques du microactuateur et du circuit microélectronique. Par ailleurs, l'étape suivante de gravure au XeF_2 nécessitera de cette façon moins de temps pour graver le silicium restant.

La figure 4.18 montrent les résultats obtenus après une gravure au TMAH 25% à 85°C pendant 90 min. Pour cette solution, le taux de gravure du plan (100) est de 30 µm/hr, tandis que les plans les plus rapidement gravés ont un taux de gravure de 52 µm/hr. Ces micrographies optiques montrent les plans de silicium sous-gravés sous deux structures en porte-à-faux ayant un angle d'orientation différent avec le méplat. Pour la structure alignée avec le direction du méplat, il est possible d'observer que les coins convexes sont rapidement gravés à l'extrémité de la poutre mais que seuls des plans {111} apparaissent de chaque côté du restant de la structure (figure 4.18a-b) Par contre, l'actuateur qui est aligné à 20° avec la direction <110> est de loin plus rapidement sous-gravée. L'orientation de cette structure avec un angle $\alpha = 20°$ permet d'utiliser les plans rapidement gravés sur chaque côté de la structure pour accélérer sa libération du substrat de silicium (figure 4.18c-d). Ainsi, pour un temps de gravure identique, les structures caractérisées par un angle $\alpha = 20°$ (pour ce design) sont plus rapidement sous-gravés que les structures alignées avec la direction <110> de la gaufre [82].

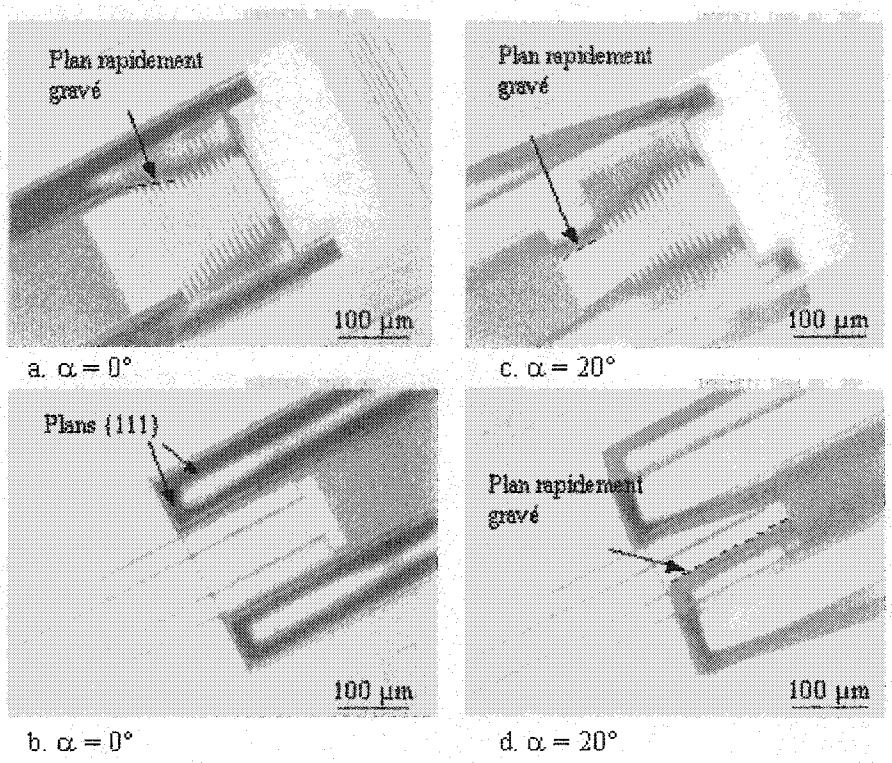
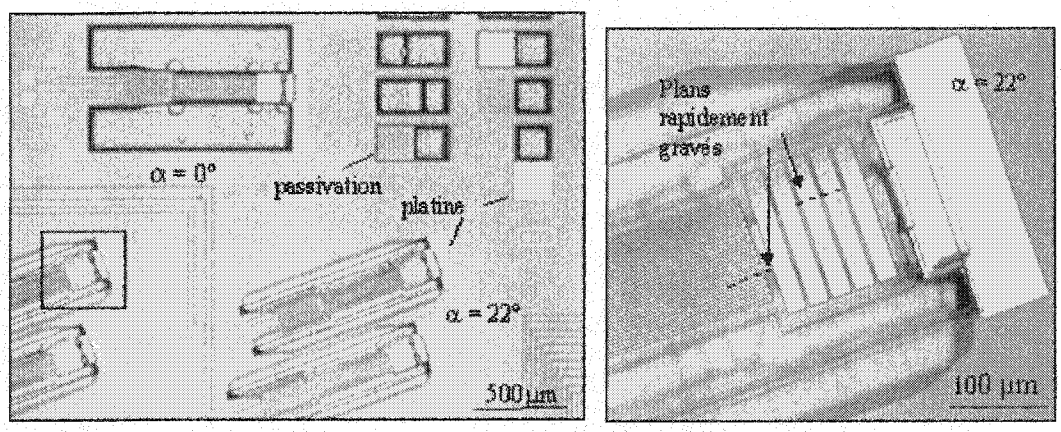


Figure 4.18: Micrographies optiques de l'extrémité et de la partie attachée de microactuateurs après une gravure au TMAH de 85°C pendant 90 min.

Afin d'optimiser cette première étape de gravure du silicium, le montage de gravure au TMAH a été amélioré pour permettre son utilisation à une température supérieure et ainsi obtenir des taux de gravure plus élevés. Ainsi, la figure 4.19 présente la micrographie du design ICBPMAT5 ayant subi une gravure au TMAH 25% à 90°C pendant 60 min. Le taux de gravure du silicium {100}, mesurée avec un profilomètre est de ~ 44 µm/hr. Le taux de sous-gravure pour les plans rapidement gravés sous la structure de la figure 4.19-b est de ~ 70 µm/hr. Il est possible de distinguer sur le pourtour de la cavité l'arrêt de la gravure au niveau des plans {111}. Du fait que la structure en porte-à-faux possède un angle d'orientation de 20° avec la direction du méplat permet non seulement de graver plus rapidement le silicium sous-jacent mais aussi d'éviter la concentration de contraintes dans la structure.



a. b.

Figure 4.19: Micrographies optiques de structures en porte-à-faux du design ICBPMAT5 après une gravure au TMAH 25% à 90°C de 60 min.

La figure 4.20 montre dans le cas d'une structure alignée avec la direction <110> que les plans rapidement gravés forment une intersection très pointue. Lorsque la structure effectue une déflexion vers le haut, il y a une concentration de contraintes en ce point qui peuvent causer des micro-cassures. Ainsi dans le cas d'un microactuateur orienté à 20-22° avec la direction du méplat, cet angle aigu n'apparaîtra pas. Il est à noter que la gravure au TMAH est arrêtée lorsque seulement une faible quantité de silicium reste en contact avec le pad court-circuiteur. De cette façon, l'ensemble de la structure reste plat et il n'y a pas de concentration de contrainte due à la déflexion de l'extrémité de la structure en porte-à-faux [89].

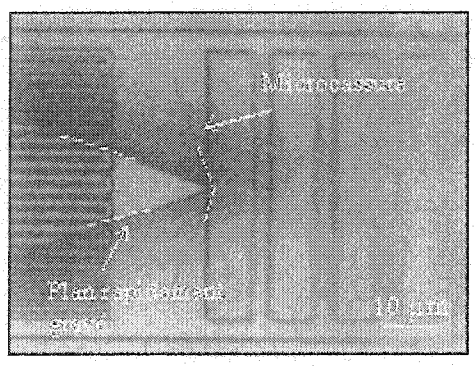


Figure 4.20: Micrographie optique d'une structure en porte-à-faux, sans couche de passivation, avec une orientation $\alpha = 0°$ avec le méplat de la gaufre, après une gravure au TMAH.

Par ailleurs, le design d'une structure en porte-à-faux comportant plusieurs trous au travers de la base en oxyde peut également accélérer la gravure du silicium en laissant le TMAH s'infiltrer directement sous la structure. Ainsi, la figure 4.21 montre une structure en porte-à-faux libérée, recouverte entièrement d'une couche de protection en platine, comportant plusieurs trous au sein de la poutre.

Des améliorations sur le design du microactuateur concernent également sa composition en fonction des couches minces du procédé standard CMOS. Plusieurs designs de structures en porte-à-faux avec une simple, double ou triple couche d'oxyde de silicium ont été soumis pour une fabrication avec la technologie Mitel 1,5 µm CMOS. Les expériences de gravure au TMAH ont montré que les structures composées d'une triple couche ACT-CON-VIA sont suffisamment résistantes face à la gravure au TMAH. Les mesures effectuées sur les combinaisons de couches d'oxydes du procédé ont montré que les couches ACT et ACT-CON sont gravées lors de la mise en forme des couches VIA et PAS.

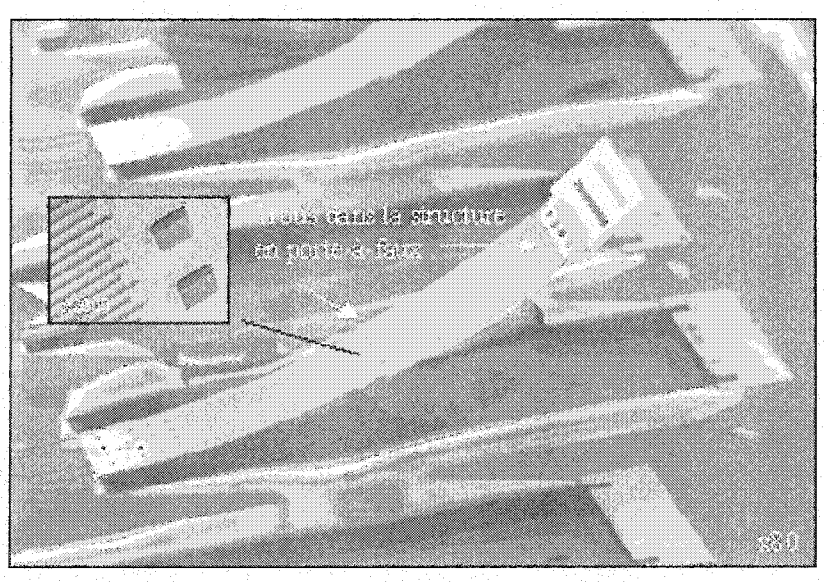


Figure 4.21: Structure en porte-à-faux du design IMBPMET9 comportant plusieurs trous afin d'accélérer la sous-gravure du silicium par le TMAH

4.4.4 Optimisation du procédé de gravure du silicium au TMAH

Le procédé de gravure au TMAH a été optimisé d'une part en améliorant le contrôle de la température de la solution de gravure et d'autre part en réduisant les risques de bris des échantillons (voir annexe D).

Par ailleurs, certains dés ont été reçus dans différents types de boîtiers tels que des DIP (dual in-line pins) 40 broches et des PGA (pin grid array) 84 broches avec des micro-soudures ou sans suivant les spécifications du concepteur. Des expériences de gravure ont été effectuées sur des dés fixés avec de la colle d'argent sur ces boîtiers. Elles ont donné de très bons résultats puisque les structures MEMS libérées sont restées intactes. Seul un léger changement de couleur du boîtier a été observé. La surface des dés était également plus propre, ce qui peut s'expliquer par le fait que le silicium gravé peut plus facilement se retirer de la surface de l'échantillon puisque la face avant est entièrement exposée à la solution de gravure. La colle d'argent maintient parfaitement le dé en place lors d'une gravure de 2 h et prévient ainsi la sous-gravure et la brisure des coins du dé. Lorsque le post-traitement Can-MEMS a été annulé en 1998, la CMC a fait parvenir des plaquettes de silicium de 100 mm puis de 150 mm ayant subi le procédé Mitel 1,5 µm CMOS. L'étape de dépôt de platine a été effectuée sur des quarts de gaufres ou de plus petits morceaux. Les expériences ont été améliorées de façon significative puisque de très faibles sous-gravures ont lieu aux coins des designs et les échantillons restent parfaitement stables pendant la gravure. En effet, du fait que le fond du bêcher contenant la solution de TMAH n'est pas plat mais bombé, les porte-échantillons peuvent glisser et se retourner dans la solution. De ce fait, les structures MEMS ne sont pas forcément soumises au même flux de TMAH dont la réaction avec le silicium crée des bulles sur la surface de l'échantillon dues au dégagement de H_2.

Pour certaines séries de fabrication, la couche de passivation au niveau des pads de contact montre des faiblesses telles que mentionnées précédemment. Une étape de dépôt de résine négative a été ajoutée après le dépôt de platine et avant la gravure au TMAH (voir annexe B). Cette étape permet de protéger les pads de contact lors d'une gravure au TMAH de 1 h à 1,5 h. Lorsque les échantillons sont retirés de la solution de TMAH, il est aisé de soulever le film de résine négative sur le pourtour de l'échantillon à l'aide de pinces en téflon.

4.4.5 Simulation de la gravure anisotrope du microactuateur au TMAH

Le logiciel AnisE de la compagnie Intellisence Corning est un outil de simulation pour la gravure anisotrope pour le design de MEMS. Ainsi en important le masque du microactuateur dessiné dans Cadence pour le design ICBPMAT5 dans le logiciel AnisE, il est possible d'effectuer la simulation de la gravure anisotrope du silicium et de visualiser en 3D les différents plans de gravure apparaissant sous la structure MEMS ainsi que sur le pourtour de la cavité. Le logiciel contient une banque de données comportant les vitesses de gravure des différents plans cristallins {100}, {110} et {111} pour les solutions de gravure KOH et TMAH selon leur concentration et leur température. Tel qu'illustré sur la figure 4.22, une solution de TMAH 25% à 88°C est caractérisée par un taux de gravure du plan (100) de l'ordre de 45 µm/hr. Ce taux de gravure correspond à celui qui a été déterminé pour les expériences de gravure sur le montage optimisé de gravure au TMAH avec une solution de 25% à 90°C. Ces paramètres de simulation ont été gardés afin d'évaluer le temps de gravure nécessaire pour libérer le microactuateur suivant son orientation avec la direction <110> du méplat de la gaufre.

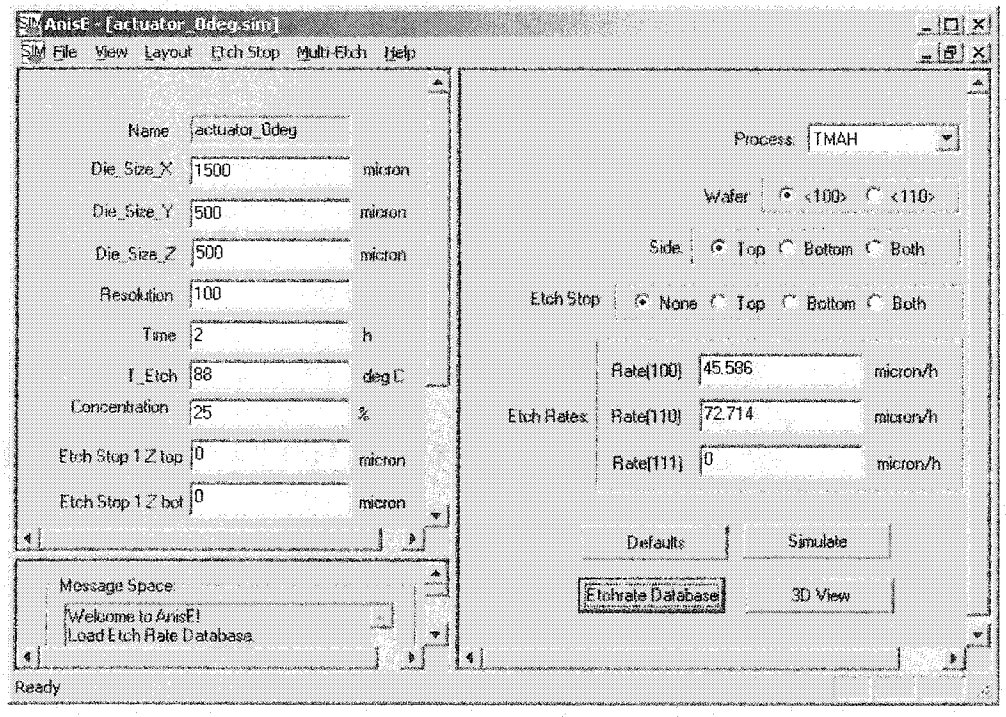


Figure 4.22: Paramètres de simulation pour la gravure anisotrope du silicium au TMAH (AnisE).

Le design du microactuateur utilisé dans les simulations AnisE est présenté sur la figure 4.23 où il apparaît avec un angle de déviation de $\alpha = 22°$. Ce plan de masque a été obtenu en utilisant le niveau de masque correspondant à la couche d'oxyde thermique dessiné avec le logiciel Cadence. Ce niveau de masque permet de visualiser le contour de la structure en porte-à-faux, les ouvertures vers le substrat de silicium et la butée.

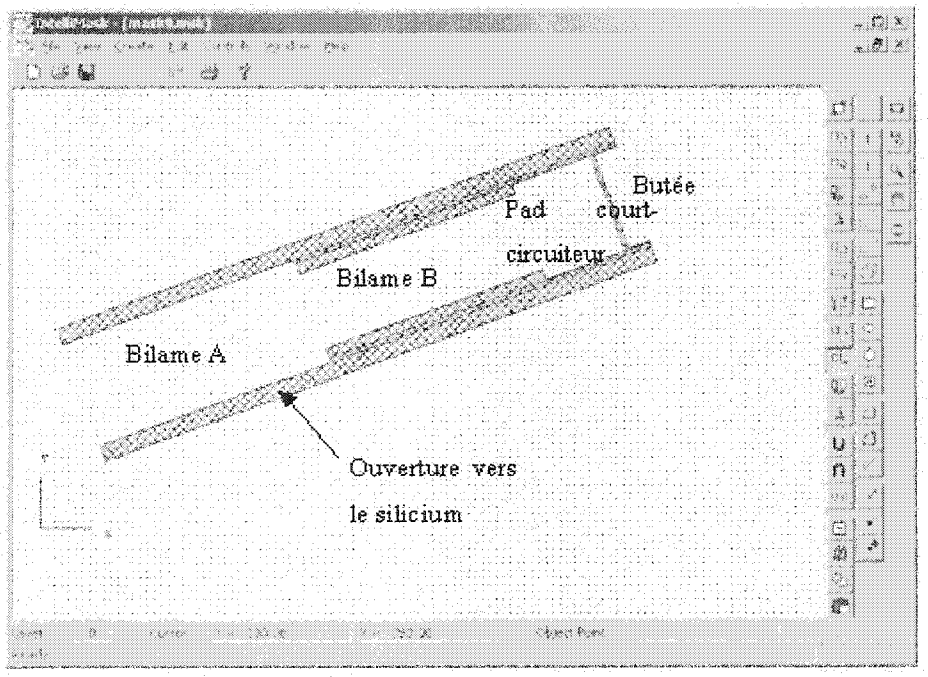


Figure 4.23: Masque du microactuateur du design ICBPMAT5 utilisé pour la simulation de la gravure anisotrope avec le logiciel AnisE.

La simulation AnisE du microactuateur du design ICBPMAT5, aligné avec la direction <110> i.e. avec un angle de déviation $\alpha = 0°$, est présentée sur la figure 4.24. Une vue en 3D, réalisée au bout de 2, 4, 6 et 8 h de gravure anisotrope au TMAH, permet d'observer l'apparition et la progression des plans rapidement gravés aux coins convexes du microactuateur. Cette simulation illustre le fait qu'une structure alignée avec la direction <110> se libère progressivement de son extrémité libre à sa partie attachée jusqu'à ce que les plans sous-gravés disparaissent au niveau des plans {111}. Selon cette simulation, une durée de l'ordre de 9,5 h est nécessaire graver complètement tout le silicium situé sous le microactuateur ce qui correspond à l'estimation de 9,4 h calculée précédemment. La gravure du silicium s'arrête lorsque les plans {111} se rejoignent au fond de la cavité.

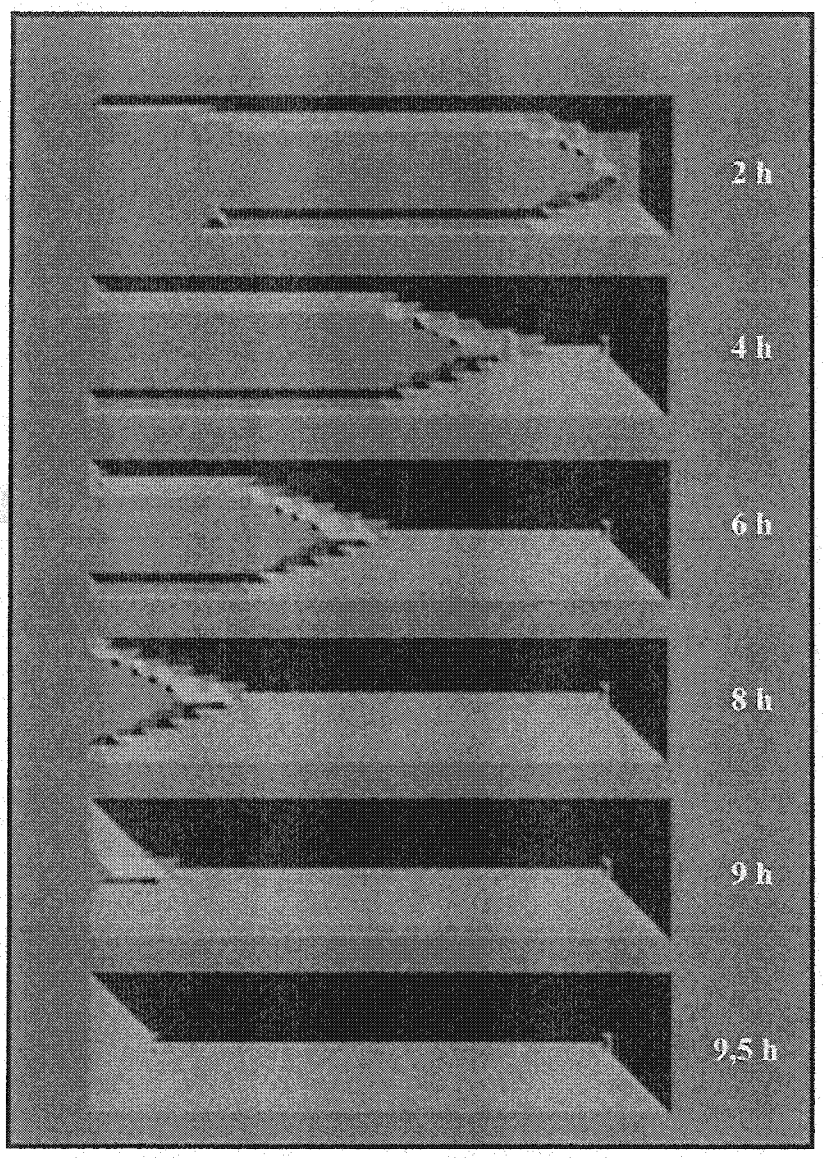


Figure 4.24: Simulation de la gravure anisotrope du silicium pour un microactuateur alignée avec la direction <110> à l'aide du logiciel AnisE.

Une micrographie optique d'un échantillon comportant le design ICBPMAT5 et ayant subi une gravure anisotrope de 2 h au TMAH est présentée sur la figure 4.25. Les larges ouvertures vers le silicium du microactuateur situé juste au-dessus des structures désalignées, permettent de visualiser avec l'apparition des plans {111} sur tout le pourtour de la cavité (zones ombrées). Par ailleurs, des plans rapidement gravés sont apparus au niveau des coins convexes du bilame A tel qu'attendus. La simulation AnisE réalisée pour une structure alignée, gravée pendant 2 h au TMAH, met moins clairement en évidence l'apparition de ces plans rapidement gravés à ce niveau.

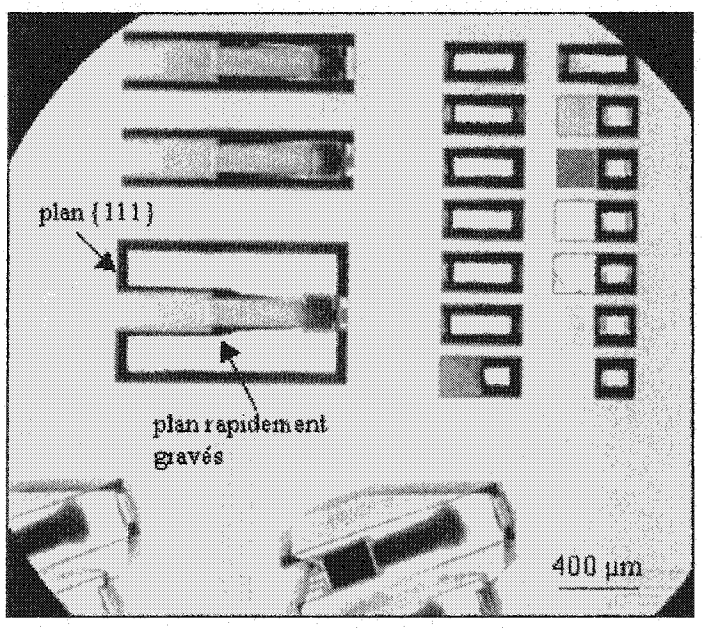


Figure 4.25: Micrographie optique de structures MEMS avec différentes orientations ayant subi une gravure au TMAH 25% wt. à 90°C pendant 2 h.

La figure 4.26 illustre la simulation d'une gravure anisotrope d'un microactuateur du design ICBPMAT5 orienté avec un angle de déviation $\alpha = 22°$ par rapport à la direction <110>. Grâce à cette orientation du microactuateur, les plans cristallins du silicium exposés sur les côtés de la structure, correspondent aux plans de gravure ayant un taux de gravure élevé. La vue en 3D au bout de 1 h, 2 h, 3 h et 4 h permet d'observer que la structure en porte-à-faux ne se libère plus à partir de son extrémité libre mais de chaque côté. Par conséquent, il suffit que les plans

rapidement gravés aient parcouru chacun la moitié de la largeur de la structure en porte-à-faux pour libérer en grande partie le microactuateur. La rencontre des plans gravés situés sous la partie encore attachée de la structure va former un nouveau un coin convexe. De ce fait, des plans rapidement gravés vont apparaître et progresser jusqu'à ce que la structure en porte-à-faux soit libérée. Ils disparaîtront à la rencontre des plans {111} formant un coin concave de la cavité. Le logiciel AnisE permet d'estimer une durée de gravure d'environ 4,25 h ce qui correspond à l'ordre de grandeur du temps de gravure de 4,3 h calculé à partir de l'équation 4.5 avec un angle de déviation $\alpha = 22°$.

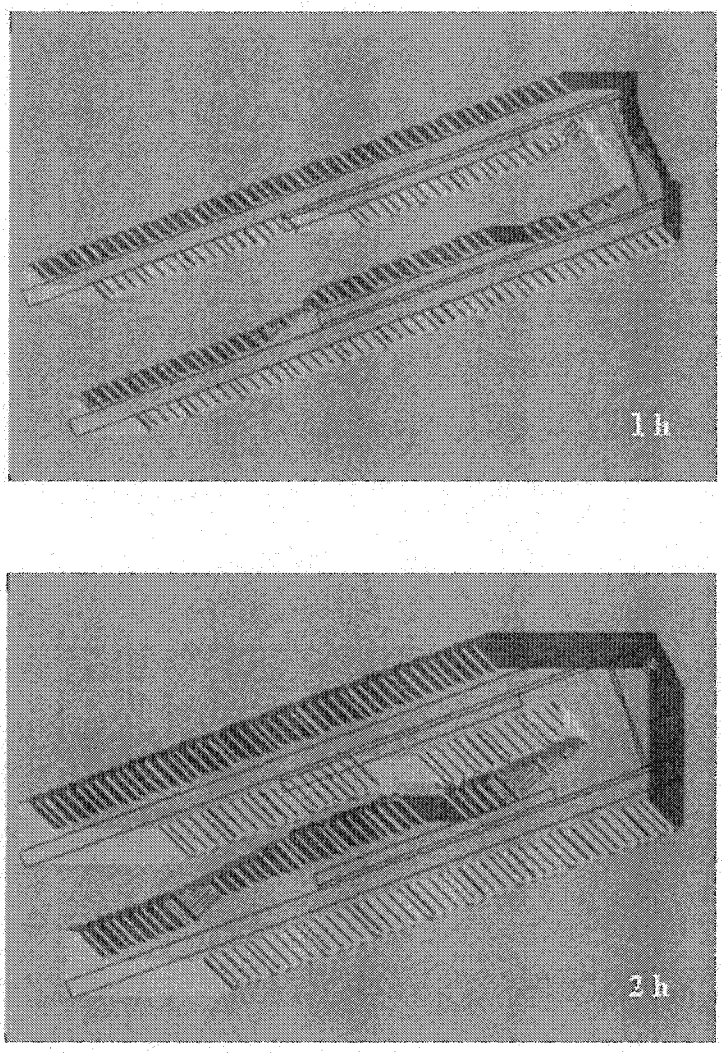


Figure 4.26: Simulation de la gravure anisotrope du silicium pour un microactuateur avec un angle de déviation $\alpha = 22°$ par rapport à la direction <110>.

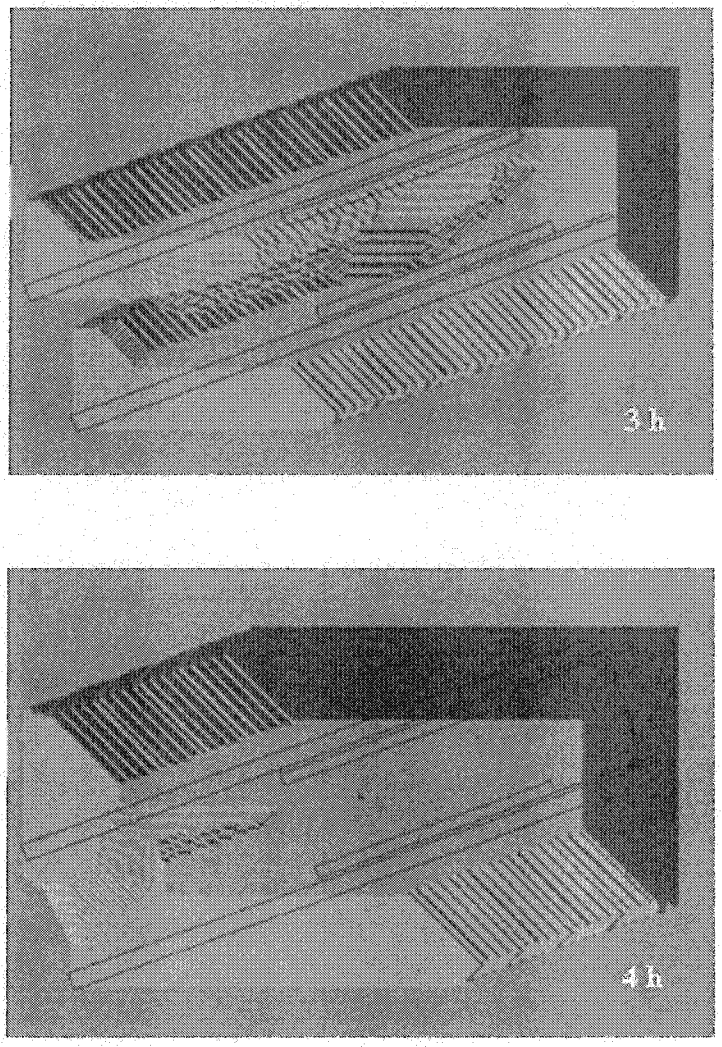


Figure 4.26 (suite): Simulation de la gravure anisotrope du silicium pour un microactuateur avec un angle de déviation $\alpha = 22°$ par rapport à la direction <110>.

La simulation de la gravure anisotrope de la structure orientée avec un angle de déviation $\alpha = 22°$ par rapport à la direction du méplat correspond au profil de gravure observé pour les échantillons gravés au TMAH. Toutefois, des différences apparaissent en ce qui concerne le contour de la cavité. En effet, des plans verticaux {100} apparaissent dans le coin supérieur gauche et inférieur droit de la cavité micro-usinée pendant la gravure de la structure. Une micrographie optique de deux structures MEMS orientées avec un angle $\alpha = 22°$ par rapport à la

direction <110> et ayant subi une gravure de 2 h dans une solution de TMAH 25% à 90°C est présentée à la figure 4.27. Sur cette figure, il est effectivement possible d'observer sur le pourtour de la cavité l'apparition des plans {111}, de plans {100} verticaux ainsi que la progression des plans rapidement gravés. Ces plans verticaux {100} n'apparaissent pas dans les simulations effectuées avec le logiciel AnisE.

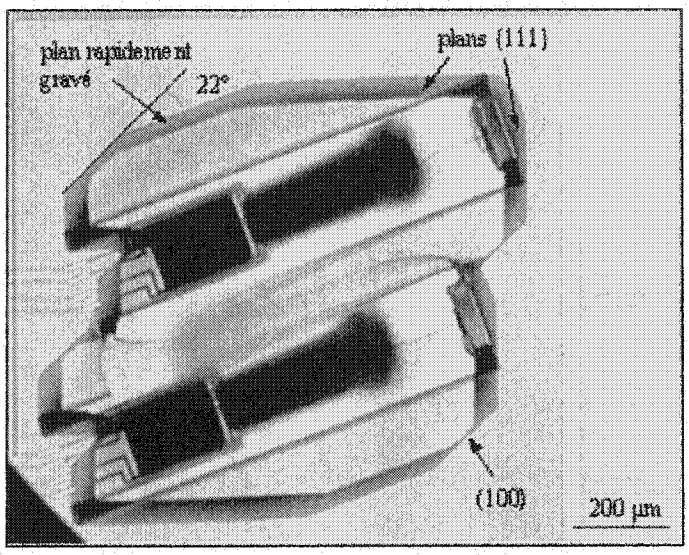


Figure 4.27: Micrographie optique de microactuateurs orientés avec un angle $\alpha = 22°$ par rapport à la direction <110> et ayant subi une gravure anisotrope de 2 h au TMAH 25% wt. à 90°C.

Cependant cet outil de simulation donne une bonne estimation du temps nécessaire pour libérer la structure avec une gravure anisotrope du silicium sous-jacent. Il est à noter que les plans {100} verticaux, apparaissant sur la figure 4.27, sont dus aux configurations concaves du masque. Par ailleurs, ces plans apparaissent en cours de gravure du fait que le taux de gravure des plans {100} est plus faible que celui des plans rapidement gravés. Ces plans font intersection avec la surface de l'échantillon avec un angle de 45° par rapport aux plans {111}. Les plans rapidement gravés se situent donc à ~ 22° des plans {111} ainsi qu'à ~ 22° des plans {100}.

4.5 Étape 3: Gravure isotrope du silicium au XeF_2

4.5.1 Gravure isotrope du silicium

Les avantages de la gravure au XeF_2 et son montage de gravure sont décrits respectivement dans les annexes C et D. Si dans les conditions normales de température et de pression, le XeF_2 apparaît sous la forme d'une poudre solide blanche, une pression de sublimation de 4 Torr permet son utilisation en phase gazeuse. Le flux de XeF_2 gazeux est contrôlé de manière cyclique au moyen des valves manuelles pour que le gaz circule dans la chambre de gravure pendant une minute puis stagne au-dessus des échantillons la minute suivante.

Pour déterminer le taux de gravure exact du silicium, des expériences de gravure ont été effectuées sur des échantillons n'ayant pas subi au préalable l'étape de gravure anisotrope au TMAH. Le taux de gravure ER (etch rate) est déterminé en mesurant au moyen d'un microscope optique muni d'un micromètre, la profondeur maximale de la cavité micro-usinée que l'on divise par le temps de gravure. Ainsi, le taux de gravure obtenu en moyenne pour le silicium est de 1,2 µm/min. Le taux de sous-gravure UER (under etch rate) est déterminé à partir des micrographies optiques en mesurant l'avancement des plans sous-gravés au XeF_2 à partir des bords du masque. Le taux de sous-gravure est de l'ordre de 1 µm/min ce qui démontre que la gravure au XeF_2 est quasi-isotrope. La figure 4.28 présente les micrographies optiques prises sur une structure MEMS du design ICBPMET7 après différents temps de gravure au XeF_2. Chaque micrographie comprend une vue générale de la structure et des agrandissements sur différentes parties de la structure: le pad court-circuiteur et la butée, le bilame A et bilame B ainsi que la partie attachée du microactuateur. Il apparaît qu'après 46 min de gravure au XeF_2 le microactuateur est en grande partie sous-gravé. Cependant, il est possible d'observer qu'une portion de silicium, située sous le pad court-circuiteur prend approximativement 100 min pour être entièrement gravée. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'une couche mince de métal est encore présente entre l'extrémité de la structure et la butée et empêche le gaz de XeF_2 d'accéder par ce côté. D'autre part, du fait que cette quantité de silicium se trouve sous le pad court-circuiteur qui est la portion la plus large du microactuateur (de l'ordre de 200 µm), il est plus difficile d'assurer un flux et une stagnation du gaz de XeF_2.

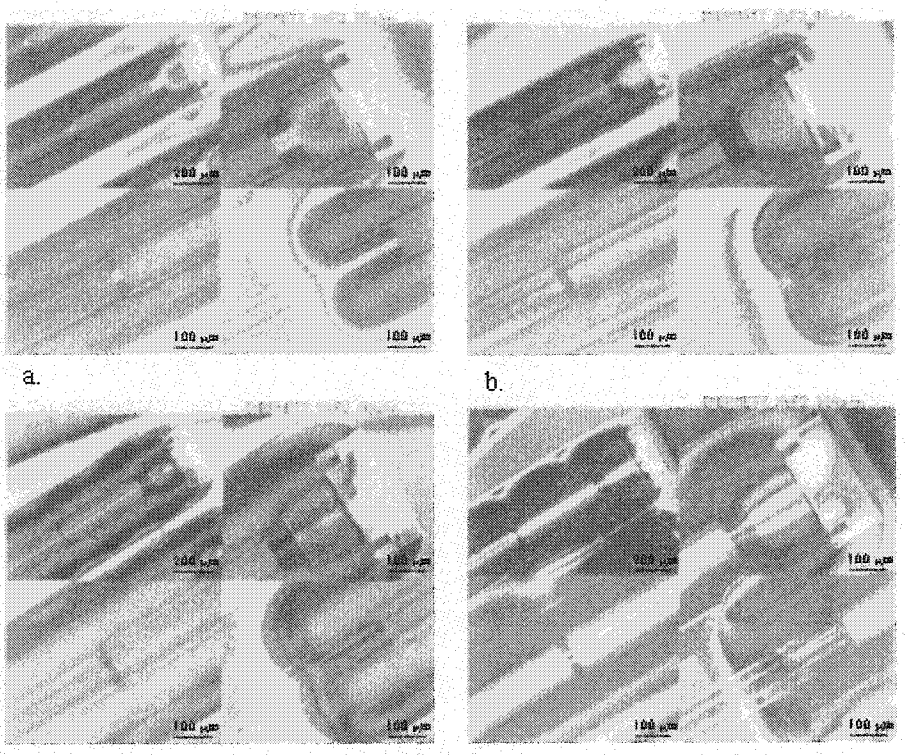


Figure 4.28: Micrographies optiques d'une structure MEMS du design ICBPMET7 après des gravures au XeF_2 de: a) 30 min, b) 46 min, c) 90 min et d) 104 min.

Ces expériences de gravure au XeF_2 sont caractérisées par un taux de sous-gravure relativement élevé de 1,6 µm/min (figure 4.28a) et pouvant même atteindre un UER de 2 µm/min (figure 4.28b). Au bout de 100 min de temps de gravure, le taux de gravure est en moyenne l'ordre de 1,3 µm/min (figure 4.28c et d). L'augmentation pourrait s'expliquer par le fait que la surface convexe de la cavité micro-usinée par le gaz de XeF_2 s'agrandit avec le temps de gravure et de ce fait plus d'atomes de silicium sont exposés au gaz et peuvent donc être arrachés au substrat de silicium. Au-delà d'une distance de sous-gravure de 90 µm, la vitesse de gravure ralentit, ce qui peut s'expliquer par le fait qu'il est plus difficile d'assurer un flux uniforme du gaz sur du silicium non exposé directement.

Par ailleurs, ce taux de gravure dépend de plusieurs paramètres qui ont été ajustés afin d'optimiser cette étape de gravure et qui seront présentées dans la section 4.6.3. Les profils de gravure observés au microscope optique en faisant varier la mise au point en divers points des cavités micro-usinées correspondent bien à une gravure quasi isotrope. L'utilisation d'un

microscope électronique à balayage permet également d'observer la rugosité des cavités micro-usinées comparativement à la planéité des plans cristallins révélés avec une gravure anisotrope au TMAH. La figure 4.29 est un agrandissement réalisé avec un MEB sous une structure MEMS et permet d'observer la rencontre des plans sous-gravés au XeF_2 pour libérer complètement le microactuateur du substrat de silicium.

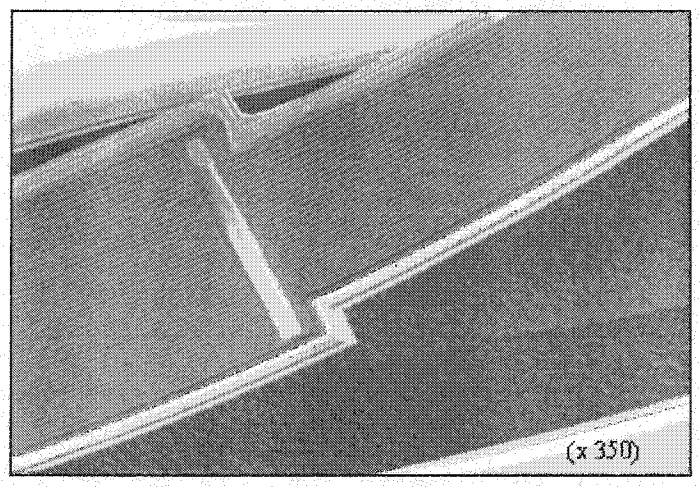


Figure 4.29: Micrographie MEB d'une structure MEMS du design ICBPMAT5 ayant subi une gravure au TMAH à 90°C de 90 min suivie d'une gravure au XeF_2 de 10 min.

4.5.2 Couches minces du procédé standard CMOS exposées au XeF_2

Les échantillons comportant le design ICBPMET8 ou ICBPMAT5 ont permis d'observer la sélectivité XeF_2 par rapport à différentes couches minces du procédé standard CMOS. Ainsi, la figure 4.30 permet de caractériser la sélectivité du XeF_2 vis à vis des carrés de couches minces du design ICBPMET8. Les carrés où il est supposé avoir les couches ACT, P1, CON, M1 ainsi que la combinaison de couches minces P1-M1 montrent que le substrat de silicium sous-jacent a été gravé au XeF_2. Par conséquent, ces couches ont été totalement gravées au cours des étapes de fabrication selon le procédé standard CMOS pour cette série de fabrication 9703CB. Cependant, il est possible de constater que les carrés correspondant aux couches VIA, M2 et PAS n'ont pas été attaqués par le XeF_2. Seule une sous-gravure du silicium, distinctement observable pour les couches transparentes VIA et PAS, s'est effectuée sous ces matériaux.

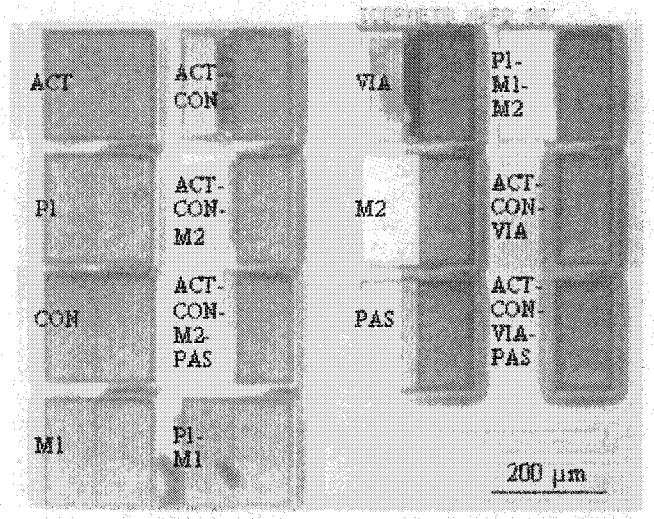


Figure 4.30: Carrés de couches minces du design ICBPMET8 après une gravure au XeF_2 de 30 min.

Cet échantillon qui a subi une gravure au XeF_2 de 30 min est caractérisé par une profondeur de gravure de 37 µm et une sous-gravure de 31 µm. Ceci correspond aux taux de gravure ER de 1,2 µm/min et de sous-gravure UER de 1 µm/min D'autre part, les combinaisons de couches de diélectriques ACT-CON, ACT-CON-VIA et ACT-CON-VIA-PAS n'ont pas subi de gravure XeF_2 ainsi que les carrés de couches ACT-CON-M2, ACT-CON-M2-PAS et P1-M1-M2. Ces résultats montrent que le XeF_2 gazeux n'attaque pas les couches d'oxyde, la couche de métal et la couche de passivation du procédé standard CMOS.

Une micrographie optique, réalisée sur un échantillon comportant le design ICBPMAT5 et ayant subi une gravure au XeF_2 de 4 min, est présentée sur la figure 4.31. Cette figure montre la sélectivité du XeF_2 par rapport aux couches M2 et PAS ainsi que les carrés de couches d'oxydes ACT-CON-VIA et ACT-CON-VIA-PAS. Cet échantillon permet également de constater que les carrés de couches P1-M1 et P1-M1-M2 ne sont pas attaqués par le XeF_2. Par contre, comparativement à l'échantillon ICBPMET8 fabriqué au cours d'une autre série de fabrication, les carrés de couches VIA et ACT-CON de cet échantillon semblent avoir été complètement surgravés au cours de la fabrication standard CMOS.

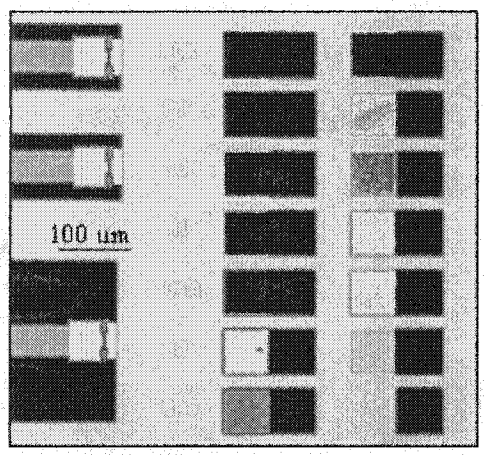


Figure 4.31: Micrographie optique des carrés de couches minces du design ICBPMAT5 ayant subi une gravure au XeF_2 de 4 min.

La figure 4.32 est la micrographie optique d'un échantillon comportant le design ICBPMAT5 comportant des motifs de platine et ayant subi une gravure au TMAH de 60 min suivie d'une gravure au XeF_2 de 10 min. Le traitement subi par cet échantillon permet de constater que le platine est également un matériau non gravé par le XeF_2. Par ailleurs, tel qu'attendu, les carrés P1-M1 et M2 ont été gravés au cours de l'étape de gravure au TMAH. Par ailleurs, le carré correspondant à la combinaison de couches P1-M1-M2, tel que discuté précédemment, n'a pas été entièrement gravé au cours de l'étape de TMAH. Cependant la sous-gravure sur 10 µm du silicium sous-jacent se distingue par un changement dans l'aspect de ce carré de couches minces.

Les micrographies optiques effectuées sur des échantillons comportant le design ICBPMAT5 montrent que la combinaison des couches d'oxyde de silicium, d'aluminium ainsi que la couche de passivation ne sont pas gravées par le XeF_2. De même, des mesures effectuées au profilomètre Dektak n'ont pas mis en évidence une gravure de ces matériaux sur ces carrés de couches minces. La structure MEMS, composée elle-même d'un empilement des couches ACT-CON-VIA, de la couche de métal M2 et de la couche de passivation PAS, n'est donc pas attaquée par le gaz de XeF_2.

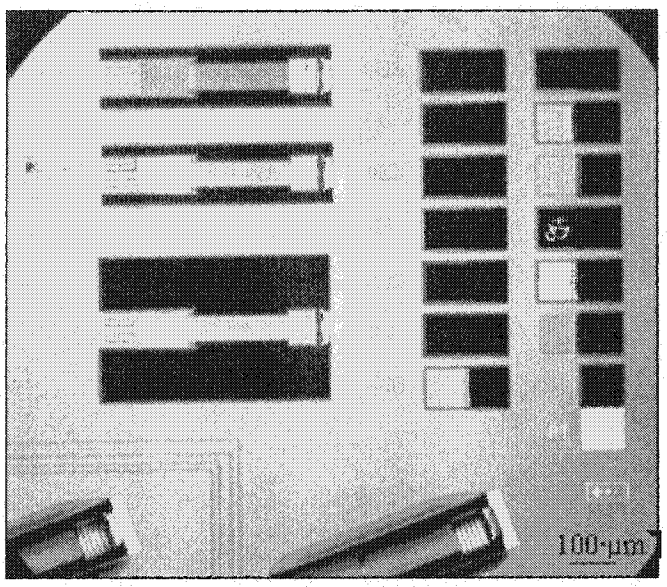


Figure 4.32: Micrographie optique d'une partie du design ICBPMAT5 ayant subi une gravure au TMAH de 60 min suivi d'une gravure au XeF_2 de 10 min.

4.5.3 Optimisation de l'étape de gravure au XeF_2

Plusieurs expériences ont montré que le taux de gravure du silicium au XeF_2 peut être réduit de façon significative si (1) les ouvertures vers le silicium sont trop petites de chaque côté de la structure; (2) trop d'échantillons sont placés dans la chambre de gravure; (3) l'échantillon n'est pas sec ou (4) il y a de l'humidité dans le système de gravure [89]. L'annexe D présente les améliorations qui ont été apportées à la procédure de gravure au XeF_2. Notons que pour le design du microactuateur, de grandes ouvertures de chaque côté de la structure afin d'exposer une plus grande surface de silicium au XeF_2 et faciliter l'entrée de gaz dans ces cavités convexes micro-usinées. Les structures MEMS sont dessinées avec des largeurs (pour les bilames A et B) les plus étroites possibles notamment pour réduire le temps de gravure nécessaire à leurs libérations complètes du substrat.

4.5.4 Combinaison de gravures au TMAH et au XeF_2

Après avoir subi une première étape de gravure liquide au TMAH, les échantillons sont soumis à une gravure au XeF_2. Pour les structures MEMS des designs ICBPMET6 et ICBPMET7, la figure 4.33 présente les résultats obtenus après une gravure au XeF_2 de 40 et 45 min respectivement. Il est à noté que cette gravure au XeF_2 a été réalisée avec une méthode pulsée (avec des cycles courts d'une durée de 1 min), une pression de 3 Torr et à température ambiante. Pour le silicium {100}, le taux de gravure est de 1,2 µm/min. Les micrographies de l'actuateur aligné parallèlement à la direction du méplat de la gaufre, montre que du silicium reste encore sous la structure en porte-à-faux. Tandis que l'actuateur orienté avec un angle α = 20° par rapport à la direction <110> est pratiquement complètement libéré [82].

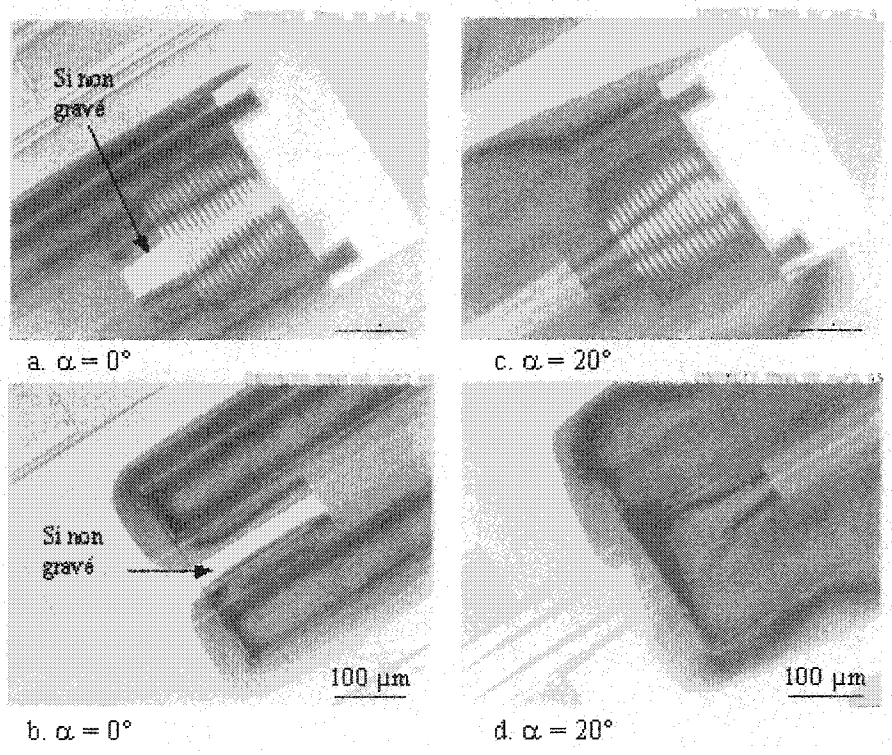


Figure 4.33: Micrographies optiques de l'extrémité et de la partie attachée de microactuateurs des designs ICBPMET6 et ICBPMET7 après une gravure au TMAH de 85°C pendant 90 min, suivie d'une gravure au XeF_2 respectivement de 40 et 45 min.

Le tableau 4.4 résume les taux de gravure et de sous-gravure du silicium caractérisé pour les gravures au TMAH et XeF_2 effectuées sur les microactuateurs du design ICBPMET6 et ICBPMET7. Il apparaît que la gravure au XeF_2 est parfaitement isotrope et permet de compléter la libération de longues structures sans risque d'attaquer la couche d'aluminium utilisée pour les résistances de chauffage des bilames.

Tableau 4.4: Taux de gravure et de sous-gravure du silicium mesurés pour les microactuateurs des designs ICBPMET6 et ICBPMET7.

Étape de gravure	Taux de gravure ER {100}	Taux de sous-gravure UER plans gravés sous la structure
TMAH 25% à 85°C	30 µm/min	55 µm/min
XeF_2 3 Torr, pulses de 1 min	1,12 µm/min	1,15 µm/min

L'échantillon ICBPMAT5 comportant la dernière génération de design du microactuateur a reçu la procédure de gravure hybride optimisée. Après une gravure au TMAH 25% à 90°C pendant 90 min, a suivi d'une seconde étape de gravure au XeF_2 de 20 min pour libérer complètement la structure. La durée du cycle de flux et de stagnation de gaz a été réduite à 30 sec, pour s'assurer que la pression dans la chambre d'expansion soit toujours de l'ordre de 3 Torr. Ceci est du au fait qu'une plus grande quantité de produit est introduite dans la chambre source pour permettre plusieurs expériences de gravure de suite. Par conséquent, la quantité de gaz produite est plus grande et a tendance à augmenter plus rapidement la pression dans la chambre d'expansion. Le tableau 4.5 résume les taux de gravure et de sous-gravure du silicium caractérisés pour les gravures au TMAH et XeF_2 effectuées sur les microactuateurs du design ICBPMAT5. La figure 4.34 présente la micrographie électronique à balayage de l'extrémité du microactuateur restée coincé sous la butée après une gravure au XeF_2 jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de silicium en contact avec la surface inférieure de la structure en porte-à-faux.

Tableau 4.5: Taux de gravure et de sous-gravure du silicium mesurés pour les microactuateurs du design ICBPMAT5.

Étape de gravure	Taux de gravure ER {100}	Taux de sous-gravure UER plans gravés sous la structure
TMAH 25% à 90°C	44 µm/min	70 µm/min
XeF_2 3 Torr, pulses de 30 sec	1,2 µm/min	1,2 µm/min

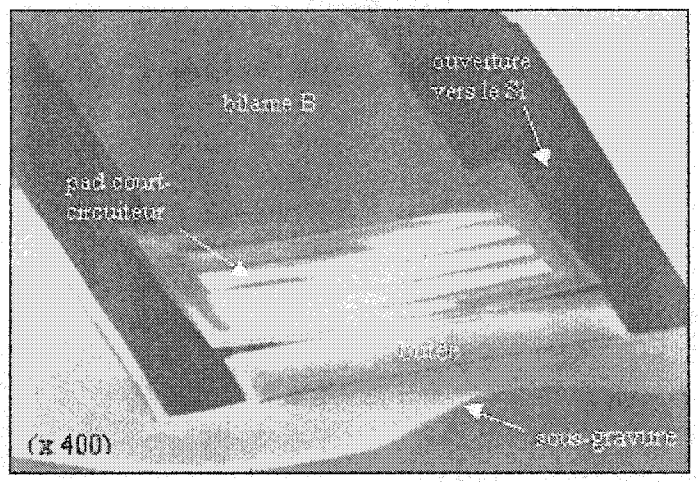


Figure 4.34: Micrographie électronique à balayage de l'extrémité d'une structure en porte-à-faux restée coincée sous la butée après une gravure hybride.

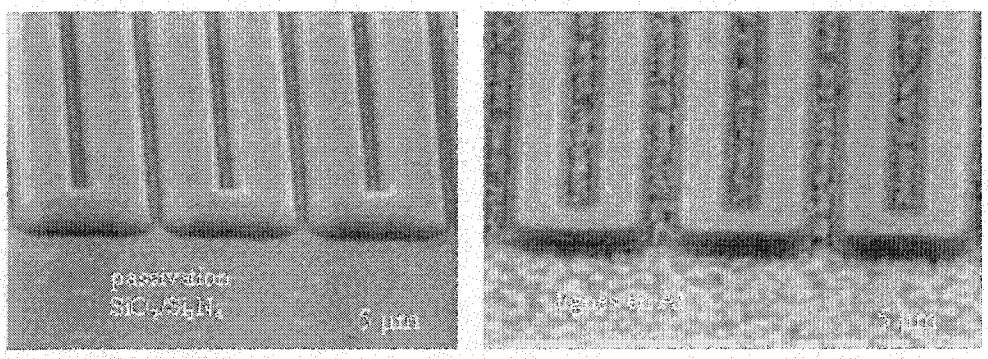
Les expériences de gravure montrent que le XeF_2 attaque très sélectivement le silicium par rapport aux couches d'aluminium, de passivation et d'oxyde de silicium. En effet, cette technique de gravure présente une excellente compatibilité avec le procédé standard CMOS. Dans notre situation, étant donné que la couche de passivation présentait des faiblesses vis-à-vis de la gravure au TMAH, l'utilisation du XeF_2 permet de compléter la sous-gravure de la structure sans attaquer la couche métallique M2 située sous la couche PAS. Par ailleurs, du fait que la gravure au XeF_2 s'effectue dans un milieu gazeux, nous évitons les problèmes liés aux solutions de gravure liquide tels que la succion qui pourrait immobiliser les structures en les maintenant "collées" au fond de la cavité.

Cette technique de gravure au XeF_2 apparaît donc comme un bon complément à celle utilisant le TMAH pour compléter rapidement (gravure isotrope avec un taux de gravure de ~1,2 µm/min) le micro-usinage de nos structures sans les endommager. L'utilisation de cette gravure hybride permet de libérer 100% des structures présentes dans une matrice double 3 par 3 du design ICBPMAT5.

4.6 Étape 4: Gravure de la couche de passivation au RIE

4.6.1 Gravure anisotrope de la couche de passivation au RIE

Une fois le micro-usinage des structures en porte-à-faux complété, une dernière étape de gravure est effectuée pour graver la double couche SiO_2/Si_3N_4 déposée par plasma en phase vapeur chimique (PECVD, plasma enhanced chemical vapour deposition). En effet, pour permettre les contacts électriques avec l'extérieur, il est nécessaire de retirer la couche de passivation sur les pads de contact (situés sur la padframe du design) et les pads court-circuiteurs des microactuateurs. Le retrait de la couche de passivation au niveau des lignes de métal du microactuateur permet d'obtenir l'effet bimétallique prévu. Tel que décrit dans l'annexe B, la gravure plasma a été réalisée dans un système RIE avec un flux de tétra-fluorure de carbone (CF_4) de 10 sccm, à une pression de 50 mTorr avec une puissance RF de 100 W. La figure 4.35 montre des lignes d'aluminium (utilisées comme résistance de chauffage pour les bilames) recouvertes initialement par la couche de passivation et après gravure au RIE (conditions décrites précédemment) pendant 25 min.



a. b.

Figure 4.35: Micrographies MEB des lignes d'aluminium protégées initialement par a) la couche de passivation et b) après une gravure RIE au CF_4.

La couche de passivation est en fait une double couche SiO_2/Si_3N_4 dont l'épaisseur mesurée est supérieure à son épaisseur nominale. Ne sachant où se situe leur interface, il est par conséquent difficile de déterminer le taux de gravure de ces matériaux sur les échantillons fabriqués selon le procédé CMOS. Cependant des gaufres tests comportant soit la couche de SiO_2 ou soit la couche de Si_3N_4 ont été fournies gracieusement par la fonderie Mitel. Les taux de gravure du nitrure et de l'oxyde de silicium de la couche de passivation ainsi que du substrat de silicium, déterminées

à partir de mesures profilométriques, sont résumés dans le tableau 4.6. Il apparaît que le plasma de CF_4 grave deux fois plus rapidement la couche de nitrure de silicium comparativement à l'oxyde de silicium de la couche de passivation.

Tableau 4.6: Taux de gravure de la couche de passivation et du silicium mesurés après une gravure RIE au CF_4 de 30 min

	$ER(Si_3N_4)$	$ER(SiO_2)$	ER(Si)
Gravure RIE 100W 50 mTorr CF_4 = 10 sccm	513 Å/min	246 Å/min	350 Å/min

4.6.2 Optimisation du procédé de gravure au RIE

Le procédé de gravure au RIE a été optimisé de façon à augmenter la vitesse de gravure de la couche de passivation. Pour ceci, un flux additionnel de 2 sccm d'O_2 a été ajouté au 10 sccm de CF_4. En effet, l'addition d'O_2 augmente la concentration de radiaux F*, puisque l'oxygène réagit avec les radicaux CF_x pour libérer les F* [90]. Le tableau 4.7 présente les taux de gravure obtenus pour les matériaux de la couche de passivation ainsi que pour le substrat de silicium. L'addition d'O_2 pour la gravure plasma au CF_4 a considérablement augmenté les taux de gravure du Si_3N_4, SiO_2 et Si. Le taux de gravure du SiO_2 a augmenté de 200 % tandis que le plasma de CF_4/O_2 grave trois plus rapidement la couche de Si_3N_4 par rapport à le couche de SiO_2. Il en résulte que la dernière étape effectuée en post-traitement sur les échantillons ICBPMAT5 ayant subi la gravure hybride au TMAH et XeF_2 est une étape de gravure RIE au CF_4/O_2 de 12 min et 36 sec. Sur les micrographies des figures 4.5 et 4.35, il apparaît que pour des échantillons de séries de fabrication différentes (0003CB et 9901CB respectivement pour ces figures), l'épaisseur de la couche de passivation n'est pas identique. En effet, il est possible d'observer que l'espace entre chaque ligne d'aluminium recouverte de la couche de passivation est réduit à ~ 0,2 µm pour le design ICBPMAT5 (voir figure 4.5). Le temps de gravure RIE doit par conséquent être adapté à l'épaisseur finale déposée par la fonderie.

Tableau 4.7: Taux de gravure de la couche de passivation et du silicium mesurés après une gravure RIE au CF_4/O_2 de 10 min

	$ER(Si_3N_4)$	$ER(SiO_2)$	ER(Si)
Gravure RIE 100W 50 mTorr CF_4 =10 sccm et O_2 = 2 sccm	2150 Å/min	750 Å/min	1500 Å/min

Finalement, le tableau 4.8 résume la stratégie de micro-usinage optimisée permettant la libération complète des microactuateurs du design ICBPMAT5

Tableau 4.8: Stratégie de micro-usinage optimisée pour le post-traitement du design ICBPMAT5.

Étape de micro-usinage	Caractéristiques	Objectif
1) dépôt de Ti/Pt par pulvérisation et lift-off	100 Å / 2000 Å 18 mTorr d'Ar HPR 504-LOR10A	recouvrir la butée afin de protéger la couche de passivation des étapes de micro-usinage
2) gravure anisotrope au TMAH	TMAH 25% wt. à 90°C ER(Si) = 0,75 µm/min	graver l'Al sacrificielle et utilisation des plans rapidement sous-gravés
3) gravure isotrope au XeF_2	XeF_2 3 Torr ER(Si) = 1,2 µm/min	compléter la libération des structures dans un environnement sec et sans attaquer les couches métalliques
4) gravure RIE au CF_4/O_2	RIE 100 W 50 mTorr ER(Si_3N4) = 0,21 µm/min ER(SiO_2) =0,075µm/min	graver la couche de passivation pour dégager les pads de contact.

4.7 Conclusions du chapitre 4

Étant donné la confidentialité sur la nature et les épaisseurs exactes des couches minces de ce procédé commercial, nous avons effectué des mesures au moyen d'un profilomètre Dektak et d'un microscope FESEM afin d'évaluer les épaisseurs des couches minces du microactuateur. L'implémentation et le post-traitement de différentes générations de microactuateurs nous ont permis d'optimiser le design du microactuateur ainsi que la stratégie de micro-usinage effectuée en post-traitement. Avec notamment des ouvertures vers le silicium orientées à $\alpha = 20°$ par rapport à la direction <110> et la présence de plusieurs coins convexes, la structure est gravée plus rapidement dans le TMAH. Nous avons amélioré les techniques de micro-usinage afin de réduire les temps de traitement à chaque étape tout en augmentant leurs efficacités et leur reproductibilité. Finalement, une gravure anisotrope au TMAH de 90 min suivie d'une gravure isotrope au XeF_2 de 10 min suffisent pour libérer ces structures MEMS de grandes dimensions (~ 1 mm).

CHAPITRE 5

CARACTÉRISATION, TESTS D'ACTUATION ET MODÉLISATION DU MICROACTUATEUR

5.1 Introduction

La stratégie de micro-usinage, présentée en détail au chapitre 4, a permis de libérer complètement les microactuateurs du substrat sans que ceux-ci ne soient endommagés au cours du post-traitement. Ce chapitre présente les caractéristiques de la structure en porte-à-faux libérée qui présente une déflexion naturelle initiale. Nous avons effectué une modélisation de la déflexion initiale d'une structure à n-couches en fonction des contraintes internes. L'application de cette modélisation à n = 3 couches permet de retrouver la déflexion initiale caractérisée expérimentalement.

Nous présentons ensuite des tests d'actuation des bilames qui ont permis d'étudier le comportement thermomécanique de la structure en mesurant sa déflexion en fonction de la puissance électrique appliquée. Nous avons développé une modélisation analytique à n-couches tenant compte de la déflexion initiale et de l'actuation thermique de la structure. L'application de ce modèle d'actuation à n = 3 couches pour notre microactuateur, permet de retrouver les mesures expérimentales. A la fin de ce chapitre, des simulations effectuées à partir de ce modèle montrent la transition du microactuateur entre ses deux états stables.

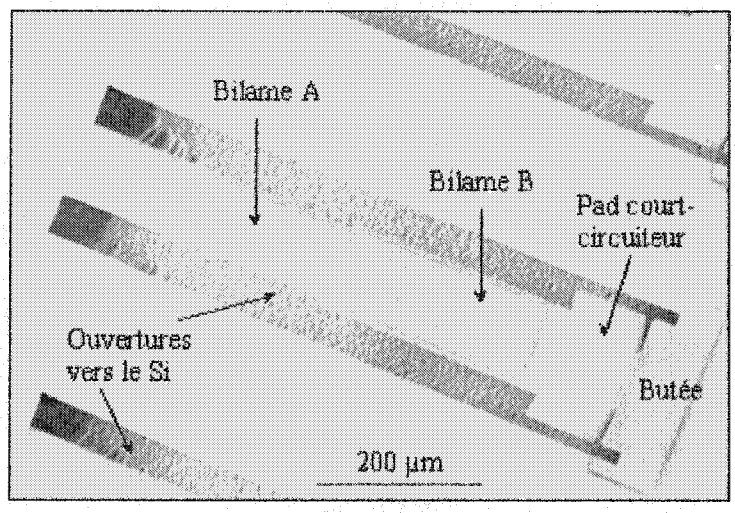
5.2 Déflexion initiale de la structure: caractérisation et modélisation

5.2.1 Observations au MEB de l'actuateur libéré du substrat de silicium

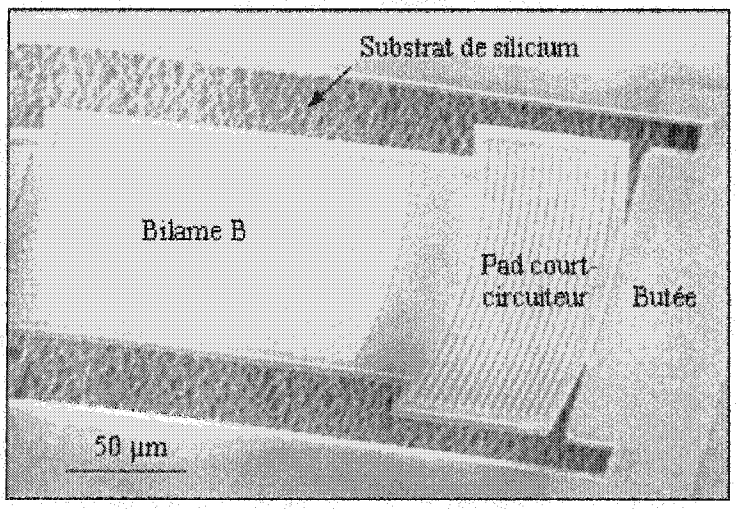
La mise en œuvre d'une gravure hybride a permis de libérer complètement les structures MEMS du substrat. Ces dernières ainsi que la surface micro-usinée du substrat ont été observés au microscope électronique à balayage (MEB).

Les micrographies MEB de la figure 5.1 montrent, pour le design ICBPMET7: a) une vue générale d'un microactuateur micro-usiné et b) une vue d'une partie de la structure en porte-à-faux incluant le bilame B, le pad court-circuiteur et la butée. Il apparaît clairement que l'extrémité de la structure reste coincée sous la butée. De plus, on peut observer une légère courbure des côtés du pad court-circuiteur due à la relaxation des contraintes internes des couches minces de la structure. Ces contraintes internes sont nécessaires pour induire une déflexion verticale de la structure lorsque le microactuateur se dégage de la butée. La figure 5.1 permet également d'observer la surface du substrat visible de chaque côté de la poutre. Le profil isotrope et la rugosité de cette surface correspondent bien aux résultats obtenus avec une gravure au XeF_2 (dernier traitement réalisé pour cet échantillon).

La figure 5.2 montre les résultats d'une gravure hybride sur un échantillon comportant le design ICBPMAT5. Les deux structures de la figure 5.2-a se trouvent dans un état stable: ON pour la structure libérée avec une déflexion verticale vers le haut et OFF pour la structure libérée dont l'extrémité est restée coincée sous la butée. La figure 5.2-b permet également de visualiser, sous la structure défléchie, l'aspect du silicium qui a été gravé en dessous. Étant donné que les gravures s'effectuent de chaque côté de la structure où se situent les ouvertures vers le silicium, il est possible de distinguer avec un agrandissement au MEB le restant d'une crête indiquant l'intersection des cavités micro-usinées.

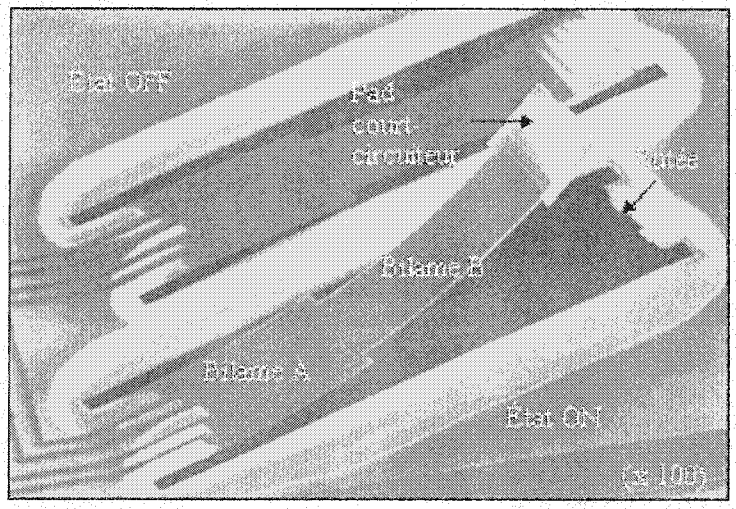


a.

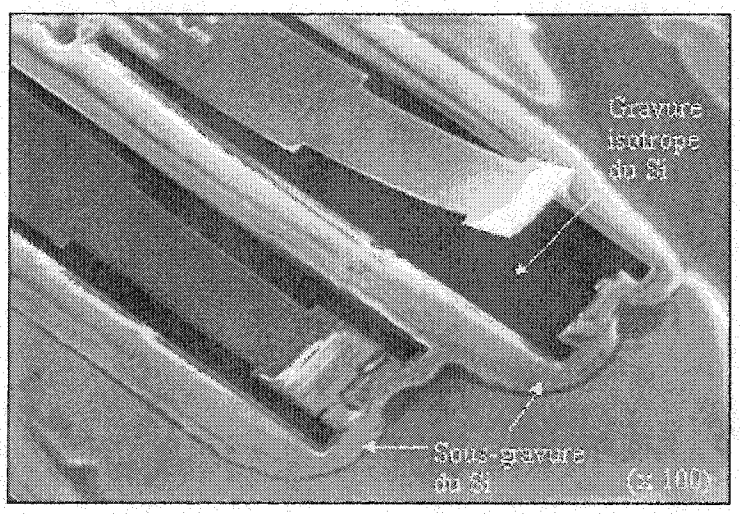


b.

Figure 5.1: Micrographies électroniques à balayage d'un microactuateur complètement libéré (α = 20°) après une gravure hybride. a) vue générale b) agrandissement avec l'extrémité de la structure coincée sous la butée.



a.



b.

Figure 5.2: Micrographies électroniques à balayage de microactuateurs (α = 22°) après une gravure au TMAH suivie d'une gravure au XeF_2 a) illustration des états ON et OFF et b) observation de la gravure isotrope du substrat sous les structures.

5.2.2 Caractérisation de la déflexion initiale du microactuateur

5.2.2.1 Profil de déflexion obtenu au moyen d'un microscope optique

Les micrographies MEB de la figure 5.2 montrent que les structures en porte-à-faux libérées ont une déflexion verticale importante par rapport à leurs dimensions. Une micrographie au microscope optique, présentée à la figure 5.3, montre une matrice de structures libérées du design ICBPMAT5. Étant donné que ces structures sont défléchies hors du plan du substrat de silicium, elles apparaissent de manière ombrée. Au moyen des vis macrométrique et micrométrique et du barillet de porte-objectifs, il est possible de faire des mises au point de manière à visualiser distinctement les lignes d'aluminium au niveau des bilames, puis du pad court-circuiteur. Les mesures de déflexion maximale des structures défléchies sont faites entre l'extrémité du pad court-circuiteur et la surface de l'échantillon (avec mise au point sur la butée par exemple). Les mesures de déflexion maximales varient d'un échantillon à un autre et se situent entre 450 et 480 µm. Par ailleurs, les mesures effectuées sur les poutres faisant partie d'une même matrice de microactuateurs montrent également une variation pouvant aller jusqu'à 8% pour les maximums de déflexion. Ces différences peuvent être dues au fait que les structures en porte-à-faux libérées n'ont pas exactement la même longueur libérée. En effet, lorsque les structures en porte-à-faux sont micro-usinées, elles peuvent ne pas bénéficier d'un flux identique de TMAH ou de XeF_2 tel que mentionné dans le chapitre 4. Ainsi des taux de sous-gravure différents vont faire varier l'emplacement où la structure reste attachée au substrat d'une poutre à une autre. Les longueurs effectives des poutres libérées ne seront donc pas les mêmes, d'où des mesures de déflexions maximales différentes. Par ailleurs, il est nécessaire de souligner que les structures apparaissant à la figure 5.3 ont subi une gravure au TMAH de 2 h afin de rompre la couche de passivation non désirée, située entre l'extrémité de la poutre et la butée. Les différents plans de sous-gravure observées sous la structure vers la partie attachée montre que la structure en porte-à-faux n'est pas complètement libérée sur toute sa longueur. La longueur effective du microactuateur est donc inférieure à la longueur nominale de 1042 µm. Selon les observations réalisées au microscope optique, cette longueur effective est comprise entre 920 et 1020 µm. Ce décalage sur l'axe (O,x), sera pris en compte pour le modélisation de la déflexion initiale de la structure.

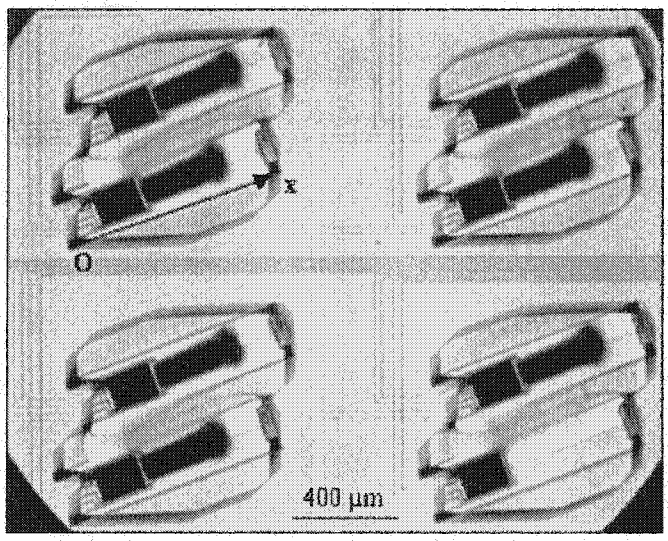


Figure 5.3: Micrographie optique d'une matrice de microactuateurs libérées du substrat.

Le profil de déflexion verticale d'une poutre libérée, est présentée à la figure 5.4. Les mesures ont été effectuées au moyen d'un microscope optique et des vis micrométriques selon l'axe horizontal (O,x) et l'axe vertical (O,z) reliées à des afficheurs digitaux. Connaissant les dimensions des différentes parties de la structure en porte-à-faux, il suffit de mesurer leur hauteur z par rapport à la surface de l'échantillon ainsi que leur abscisse x. Ce profil montre que la structure a une courbure de déflexion très importante compte tenu de ses dimensions. En effet, la poutre peut défléchir jusqu'à cent fois sa propre épaisseur hors du plan du substrat soit près de 43% de sa longueur. L'incertitude estimée pour chaque point de mesure est de ± 3 µm selon les axes (O,x) et (O,z). Cependant les échelles de la figure 5.4 ne permettent pas de visualiser ces barres d'erreur qui se confondent avec les icônes représentant les points de mesures. Il est intéressant de noter que sur une distance inférieure à 100 µm (du côté de la partie attachée) la déflexion est nulle, ce qui vient confirmer la présence de silicium non entièrement sous-gravé sous cette partie de la structure. Les structures du design ICBPMAT5, présentent une déflexion verticale significative de l'ordre de 450 µm. Il n'est pas possible de prévoir cette distance de déflexion sans savoir les contraintes internes dans les couches (d'avance). Or, l'empilement de toutes les couches d'oxydes du procédé devait présenter des contraintes internes très basses et convenir pour la fabrication de structures MEMS [80]. Du fait de l'utilisation d'un procédé commercial CMOS, peu d'informations sont divulguées concernant les méthodes et conditions de dépôt des couches minces qui sont confidentielles.

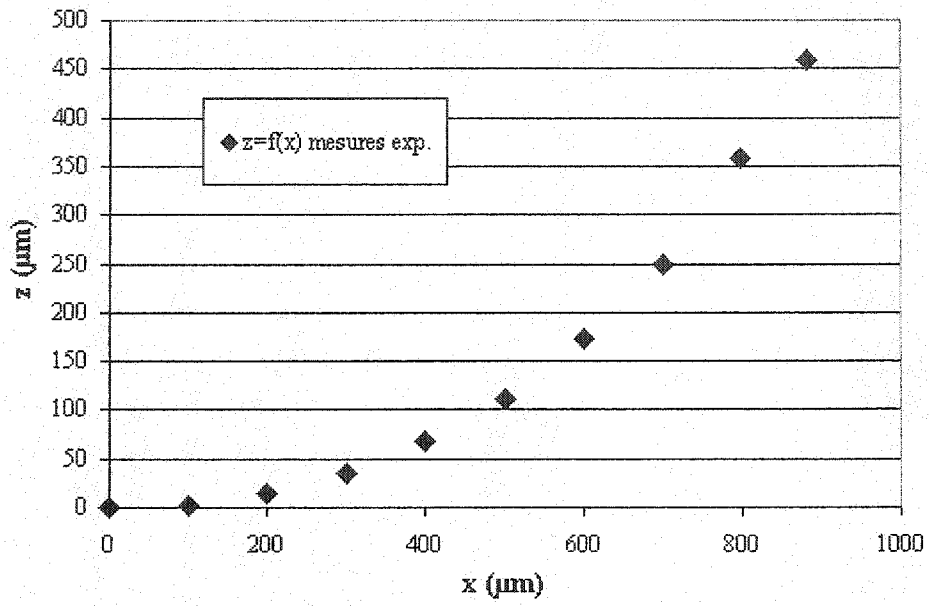


Figure 5.4: Mesures expérimentales du profil de déflexion d'un microactuateur libéré.

Lors de la conception du microactuateur, les valeurs de contraintes internes dans chacune des couches minces étaient inconnues et il était impossible de les mesurer après le dépôt de toutes les couches minces du procédé. Il apparaît donc que ce procédé peut induire un degré de contraintes internes très élevé dans les couches minces pouvant faire obstacle au bon fonctionnement du microactuateur. Ce haut degré de contraintes internes peut être dû aux différents coefficients d'expansion thermique des matériaux ainsi qu'à l'historique thermique subi par le substrat pendant le procédé de fabrication. Le retrait du substrat de silicium sous-jacent permet donc une relaxation des contraintes internes de ces couches minces. Par ailleurs, la figure 5.4 montre que la déflexion naturelle du microactuateur a un rayon de courbure constant. La courbure semble donc faiblement influencée par le fait que les différentes sections du microactuateurs ne sont pas homogènes, la couche mince d'aluminium étant située principalement au niveau des bilames et du pad court-circuiteur.

5.2.2.2 Profil de déflexion obtenu avec un profilomètre optique 3D

Des images en 3D de la structure MEMS défléchie ont été obtenues à partir de mesures profilométriques au CNES de Toulouse. L'analyse du profil de déflexion obtenu, comparé à celui obtenu avec le microscope optique est présentée dans l'annexe D.

5.2.3 Modélisation de la déflexion initiale d'une structure bimorphe

La variation de la contrainte interne, au travers de l'épaisseur de la structure bicouche, induit un moment de courbure faisant défléchir la structure hors du plan du substrat lorsque celle-ci se dégage de la butée. Dans cette section, une expression du rayon de courbure de la structure bimorphe est déterminée en fonction des contraintes internes. Le profil théorique de déflexion de la structure bimorphe en fonction des contraintes internes dans les couches de SiO_2 et d'Al est ensuite comparé au profil de déflexion de la figure 5.4. De cette façon, nous pourrons déduire l'influence de la couche de passivation sur l'ensemble de la structure.

5.2.3.1 Rayon de courbure en fonction des contraintes internes σ_1 et σ_2

Déterminons l'expression du rayon de courbure caractérisant la déflexion initiale de la structure en fonction de ses paramètres géométriques et des contraintes internes des couches minces, responsables de la courbure de la structure à température ambiante. La figure 5.5-a illustre une structure en porte-à-faux de longueur L, de largeur $b = b_1 = b_2$ et d'épaisseur totale t. Cette structure bimorphe est composée de deux couches minces d'épaisseurs respectives t_1 et t_2 et de contraintes internes résiduelles σ_1 et σ_2 avant la libération de la structure du substrat tel qu'illustré à la figure 5.5-b. Les contraintes résiduelles de la figure 5.5-b sont représentées dans la direction positive. Les contraintes de compression sont considérées négatives et de directions opposées à celles des contraintes en tension. La figure 5.5-c illustre, pour les matériaux de modules d'Young différents E_1 et E_2 et de moment d'inertie I_1 et I_2, les forces P_1 et P_2 et leurs moments M_1 et M_2 appliqués une portion de la structure bimorphe due à leurs contraintes internes (les directions positives sont indiquées pour toutes ces quantités sur cette figure). On suppose que les forces résultantes agissent au centre de leur section transversale respective. Les équations 2.1 et 2.2 d'équilibre entre les forces P_1 et P_2 et les moments M_1 et M_2 peuvent s'appliquer à ce système qui n'est soumis à aucune autre force extérieure dans son état naturel défléchi.

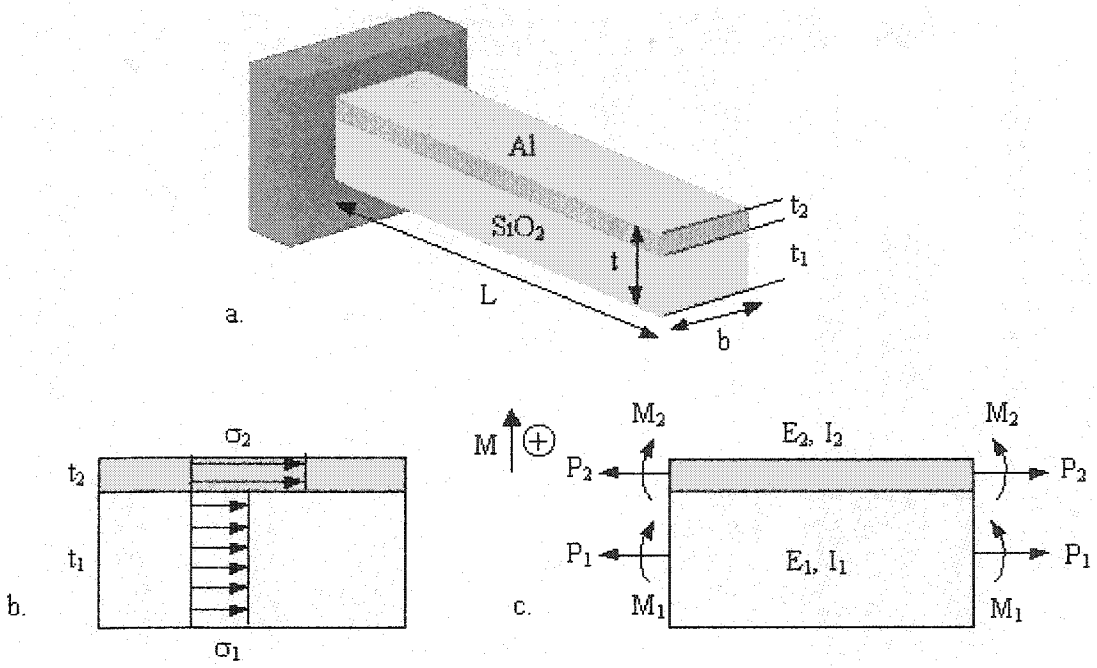


Figure 5.5: Structure en porte-à-faux bimorphe a) vue générale en perspective b) coupe longitudinale avec distribution des contraintes résiduelles et c) moments et forces résultants.

La rigidité équivalente $(EI)_{équiv}$ de la structure s'exprime par:

$$(EI)_{équiv} = E_1 I_1 + E_2 I_2 \tag{5.1}$$

$$\Leftrightarrow \quad (EI)_{équiv} = \frac{(E_1 b_1 t_1^2)^2 + (E_2 b_2 t_2^2)^2 + 2E_1 E_2 b_1 b_2 t_1 t_2 (2t_1^2 + 3t_1 t_2 + 2t_2^2)}{12(E_1 b_1 t_1 + E_2 b_2 t_2)} \tag{5.2}$$

À partir de l'expression du moment total $M = M_1 + M_2$:

$$M = \frac{(EI)_{équiv}}{r} = P \cdot \frac{(t_1 + t_2)}{2} \tag{5.3}$$

on obtient la force induite P en fonction du rayon de courbure:

$$P = \frac{2(EI)_{équiv}}{(t_1 + t_2) \cdot r} \tag{5.4}$$

La continuité de la déformation à l'interface entre les deux couches minces conduit à l'équation:

$$\frac{\sigma_1}{E_1} + \frac{P}{E_1 t_1 b_1} + \frac{t_1}{2r} = \frac{\sigma_2}{E_2} - \frac{P}{E_2 t_2 b_2} - \frac{t_2}{2r} \tag{5.5}$$

En effectuant une comparaison avec l'équation 2.5, on retrouve les composantes de la déformation dans chaque couche mince dues: à la force axiale P et à la courbure k = 1/r de la poutre. Par contre, la déformation due à la dilatation thermique du matériau est remplacée par la déformation due à la contrainte interne dans la couche mince dans l'équation 5.5. Les équations 5.1 et 5.4 combinées à l'équation 5.5 permettent d'obtenir une expression du rayon de courbure en fonction des dimensions de la structure bimorphe, des modules d'Young et des contraintes internes des couches minces utilisées.

$$r = \frac{\left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) + \frac{2(EI)_{équiv}}{t_1 + t_2} \cdot \left(\frac{1}{E_1 b_1 t_1} + \frac{1}{E_2 b_2 t_2}\right)}{\frac{\sigma_2}{E_2} - \frac{\sigma_1}{E_1}} \tag{5.6}$$

Cette équation confirme l'expression publiée sous une autre forme par Judy *et al.* [91].

5.2.3.2 Déflexion initiale d'une structure en fonction de son rayon de courbure

Afin de déterminer l'équation reliant la déflexion d de l'extrémité de la poutre avec le rayon de courbure r, les notations de la figure 5.6 sont utilisées.

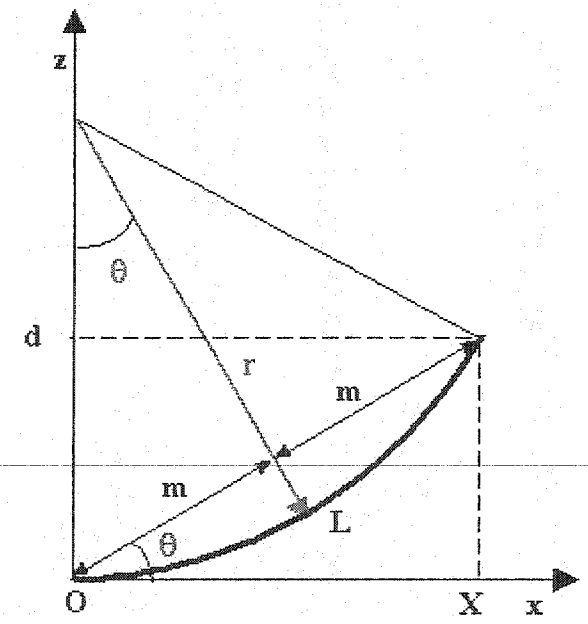


Figure 5.6: Représentation schématique du profil de déflexion d'une structure en porte-à-faux de longueur L et de rayon de courbure r.

La trigonométrie conduit aux relations suivantes:

$$\theta = \frac{L}{2r} \tag{5.7}$$

et $$\sin\theta = \frac{m}{r} = \frac{d}{2m} \tag{5.8}$$

d'où $$\sin^2\left(\frac{L}{2r}\right) = \frac{d}{2r} \tag{5.9}$$

Par conséquent, l'expression cherchée de la déflexion d de l'extrémité de la poutre de longueur L en fonction de son rayon de courbure r est donnée par:

$$d = r\left(1 - \cos\left(\frac{L}{r}\right)\right) \tag{5.10}$$

Afin de tracer le profil de déflexion en coordonnées cartésiennes, nous utilisons l'équation reliant la déflexion d de la poutre à sa projection X sur l'axe (O,x):

$$X^2 + (d - r)^2 = r^2 \tag{5.11}$$

Cette équation correspond à celle d'un cercle de centre (O,r) et de rayon r dont une portion correspond au profil de la poutre défléchie de la figure 5.6.

Par conséquent, pour $X \leq r$, l'expression de la déflexion de la poutre en fonction du rayon de courbure r et de sa projection X sur l'axe (O,x) est donnée par:

$$d = r\left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{X}{r}\right)^2}\right) \tag{5.12}$$

En utilisant les équations 5.6 et 5.12, nous pouvons donc tracer les profils de déflexion d'une structure bimorphe connaissant ses dimensions et ses propriétés mécaniques (modules d'Young et contraintes internes).

5.2.3.3 Modélisation bimorphe de la déflexion initiale du microactuateur

Afin de nous aider à modéliser le comportement thermomécanique du microactuateur, des informations concernant les contraintes internes dans les couches minces du procédé Mitel nous ont été communiquées. À partir de ces informations, l'application d'une contrainte en compression de σ_1 = -300 MPa (couche de SiO_2) et d'une contrainte en tension de σ_2 = +200 MPa (couche d'Al) a permis de déterminer approximativement la déflexion initiale du microactuateur sans la couche de passivation. Pour ce modèle bimorphe, les paramètres utilisés pour déterminer le rayon de courbure r et la déflexion maximale z_{max}, selon les contraintes dans les couches de SiO_2 et d'Al, sont résumées dans le tableau suivant:

Tableau 5.1: Paramètres physiques utilisés pour le modèle bimorphe de la déflexion initiale.

Dimensions poutre	SiO_2	Al	Déflexion naturelle
L = 1044 µm	t_1 = 2,56 µm	t_2 = 0,8 µm	$d_{init} = z_{max}$ = 663,7 µm
b = 145 µm	E_1 = 74 GPa	E_2 = 69 GPa	r = 666,2 µm
	σ_1 = -300 MPa	σ_2 = 200 MPa	

Ce tableau montre que la structure bimorphe SiO_2/Al atteint une déflexion maximale élevée puisqu'elle est de l'ordre de grandeur du rayon de courbure. De ce fait, l'extrémité de la structure se retrouve à la verticale. Les déflexions maximales mesurées pour les microactuateurs libérées étaient comprises entre 440 et 480 µm. Nous pouvons donc en déduire que l'addition de la couche de passivation permet de réduire la déflexion initiale de la structure. En effet, expérimentalement nous avons observé une accentuation significative de la courbure de la structure lors du retrait de la couche de passivation par gravure RIE. La micrographie optique de la figure 5.7 montre les extrémités recourbées de microactuateurs après une gravure au RIE. La comparaison des figures 5.3 et 5.7 met clairement en évidence que la présence de la couche de passivation réduit la déflexion initiale du microactuateur. Pour les microactuateurs de la figure 5.7, les déflexions maximales estimées à partir de leurs projections suivant l'axe (O,x) et en considérant un rayon de courbure constant se situent entre 640 et 680 µm.

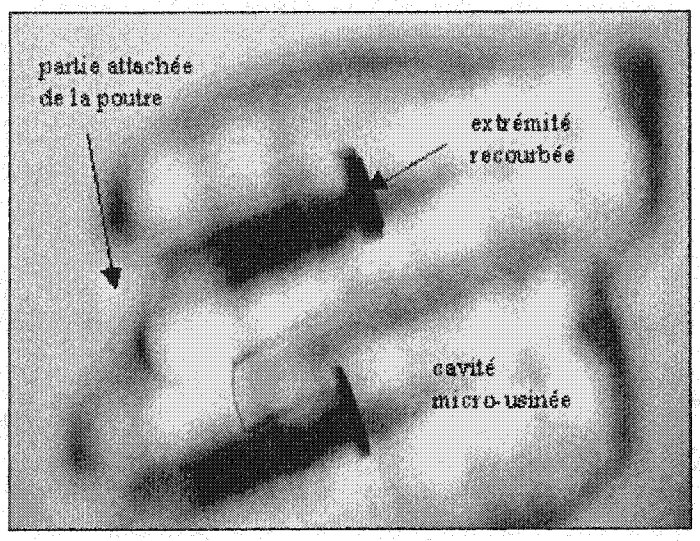


Figure 5.7: Micrographie optique de microactuateurs libérés du substrat dont la couche de passivation a été gravée au RIE.

La figure 5.8 regroupe les simulations des différents profils de déflexion de la structure bimorphe lorsqu'on fait varier la contrainte σ_1 dans la couche de SiO_2 en maintenant la contrainte σ_2 à 200 MPa dans la couche d'Al. On voit que les variations de σ_1 influencent de façon significative la courbure finale de la structure libérée avec des déflexions variant entre 725 µm (σ_1 = -400 MPa) et 144,5 µm (σ_1 = 100 MPa). Nous avons ajouté en ligne pointillée, les profils de déflexion maximale et minimale des microactuateurs de la figure 5.7. Il apparaît que le profil de déflexion simulé avec les valeurs σ_1 = -300 MPa et σ_2 = 200 MPa est celui qui vérifie le mieux les résultats expérimentaux. Or, ces valeurs de contraintes correspondent bien à celles que nous a fournie la fonderie. Notre modèle analytique bimorphe de la déflexion initiale du microactuateur est donc validé par nos mesures expérimentales. Sur cette figure, le profil de déflexion expérimental "z = f(x) mesures exp." pour le microactuateur SiO_2-Al-PAS suggère effectivement que la couche de passivation a tendance à faire défléchir la structure vers le bas.

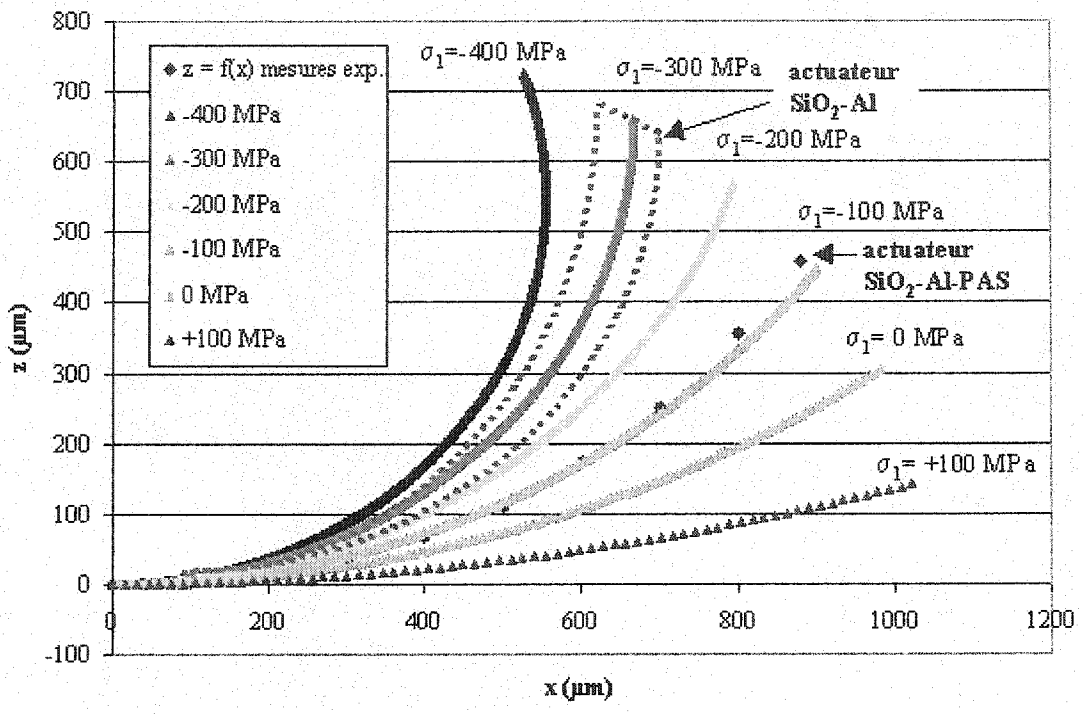


Figure 5.8: Profils de déflexions théoriques de la structure SiO_2-Al avec σ_1 variant de -400 MPa à 100 MPa et σ_2 = 200 MPa simulées avec le modèle bimorphe de la déflexion initiale.

Il faut noter que pour σ_1 = -400 MPa, la déflexion maximale z_{max} = 725 µm est supérieure au rayon de courbure r = 552 µm. Dans les cas où d ≥ r, les profils de déflexion ont été tracés en exprimant l'équation 5.11 dans un système de coordonnées polaires. Ceci nous permet d'observer les profils de déflexion des structures bimorphes recourbées en coordonnées cartésiennes.

Malgré une faible épaisseur de la couche mince en aluminium par rapport à celle de la couche d'oxyde, la valeur de sa contrainte interne peut également influencer de façon significative la déflexion initiale de la structure. Avec une contrainte σ_2 en compression de -300 MPa, la déflexion maximale atteint 722 µm tandis qu'une contrainte en tension de 200 MPa, peut réduire la déflexion initiale à 188 µm. L'évolution de la déflexion maximale de la structure en fonction des variations des contraintes internes σ est résumée sur la figure 5.9.

Il apparaît que plus la contrainte σ_1 est compressive et plus la contrainte σ_2 est en tension, plus la déflexion verticale de la structure augmente. Pour une déflexion maximale inférieure à 450 µm approximativement, les déflexions évoluent de façon linéaire et opposée. En effet, du fait que le SiO_2 se situe sur la partie inférieure de la structure et que l'Al se situe au-dessus, pour une même contrainte interne, ils agissent de façon opposée. Au dessus de 450 µm, l'évolution de la déflexion maximale n'est plus linéaire du fait que la structure a tendance à se recourber sur elle même. Sur cette figure 5.9, nous avons indiqué la déflexion initiale d_{init} que nous avons déterminé précédemment pour les microactuateurs de la figure 5.7. Les valeurs σ_1 = -300 MPa et σ_2 = +200 MPa semblent donc correspondre aux contraintes internes des couches induisant les déflexions initiales observées expérimentalement.

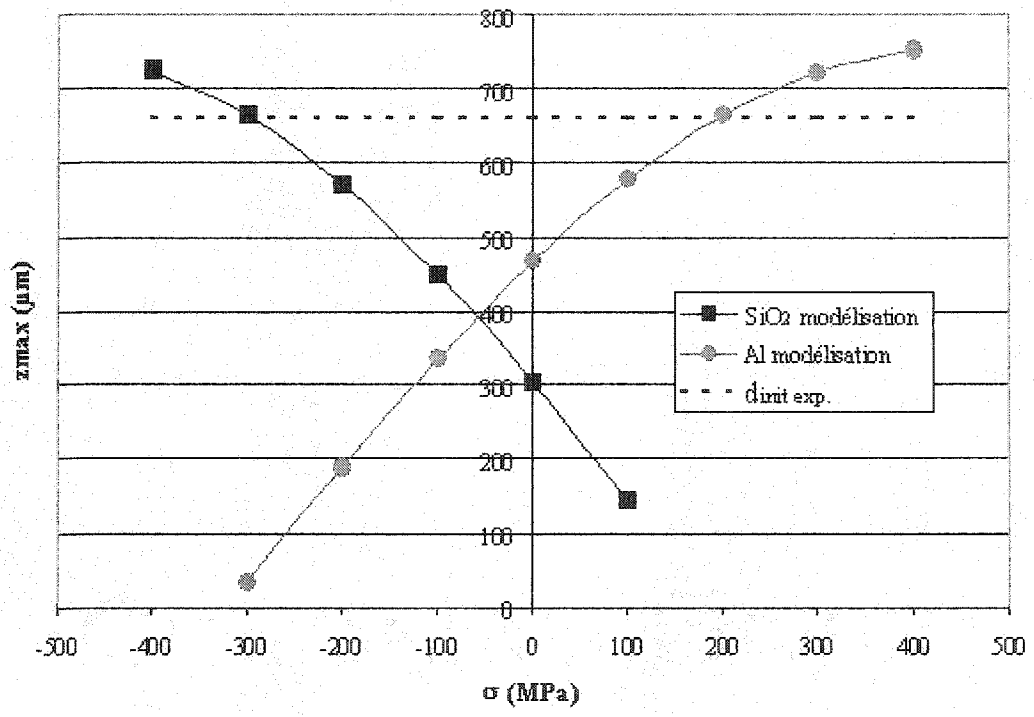


Figure 5.9: Déflexions maximales du microactuateur SiO_2-Al en fonction de: 1) la variation de σ_1 avec σ_2 = 200 MPa et 2) la variation de σ_2 (Al) avec σ_1 = -300 MPa simulées avec le modèle bimorphe de la déflexion initiale.

5.2.4 Modélisation de la déflexion initiale d'une structure multimorphe

Étant donné que les structures de la figure 5.3 ont été libérées en utilisant une longue gravure au TMAH, la couche de passivation est restée sur l'ensemble de la structure afin de protéger les lignes d'aluminium du TMAH. Les microactuateurs ne sont donc plus des structures bimorphes avec des couches d'oxyde de silicium et d'aluminium mais des structures trimorphes avec une couche de passivation additionnelle. Par conséquent, le modèle a été généralisé au cas d'une structure multimorphe à n-couches, puis appliqué au cas d'une structure trimorphe.

5.2.4.1 Rayon de courbure en fonction des contraintes internes σ_i (i = 1 à n)

La figure 5.10 représente une vue schématique d'une portion de structure à n-couches. Une force axiale P_i et un moment de courbure M_i s'applique sur chaque couche i d'épaisseur t_i, de module d'Young E_i et de contrainte interne σ_i.

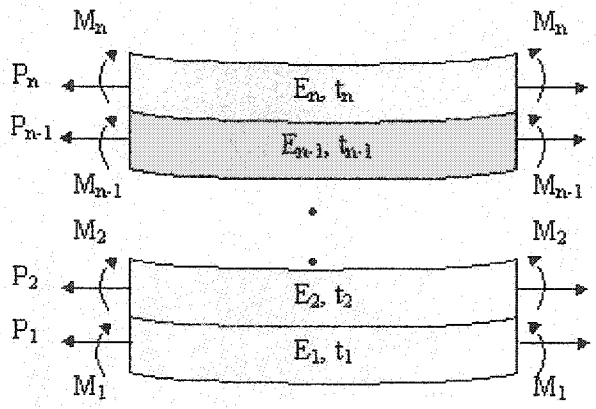


Figure 5.10: Vue schématique d'une portion de structure à n-couches avec les forces axiales P_i et les moments de courbure M_i.

À l'équilibre, la somme des forces appliquées sur la portion de structure est nulle d'où:

$$\sum_{i=1}^{n} P_i = 0 \tag{5.13}$$

Déterminons l'expression de la somme des moments M_i en fonction des forces P_i pour le système de la figure 5.10:

$$\sum_{i=1}^{n} M_i = \sum_{i=1}^{n} [P_i \cdot \sum_{j=1}^{i-1} (t_j + \frac{t_i}{2})] \tag{5.14}$$

$$\Leftrightarrow \qquad \sum_{i=1}^{n} M_i = P_1 \frac{t_1}{2} + \ldots + P_i \sum_{j=1}^{i-1} (t_j + \frac{t_i}{2}) + \ldots + P_n \sum_{j=1}^{n-1} (t_j + \frac{t_n}{2}) \tag{5.15}$$

En combinant les équations 5.13 et 5.15, on obtient:

$$\sum_{i=1}^{n} M_i = P_1 \frac{t_1}{2} + \ldots + P_i \sum_{j=1}^{i-1} (t_j + \frac{t_i}{2}) + \ldots - (P_1 + P_2 + \ldots + P_{n-1}) \sum_{j=1}^{n-1} (t_j + \frac{t_n}{2}) \tag{5.16}$$

$$\Leftrightarrow \qquad \sum_{i=1}^{n} M_i = \sum_{i=1}^{n-1} \left[P_i \cdot \left(\sum_{j=1}^{i-1} (t_j + \frac{t_i}{2}) - \sum_{j=1}^{n-1} (t_j + \frac{t_n}{2}) \right) \right] = \sum_{i=1}^{n-1} [-P_1 \cdot \frac{1}{2} (t_i + 2 \sum_{j=i+1}^{n-1} t_j + t_n)] \tag{5.17}$$

$$\Leftrightarrow \qquad \sum_{i=1}^{n} M_i = \sum_{i=1}^{n-1} - l_i P_i \tag{5.18}$$

avec $$l_i = \frac{1}{2} (t_i + 2 \sum_{j=i+1}^{n-1} t_j + t_n) \tag{5.19}$$

En utilisant l'expression du moment M_i en fonction du moment d'inertie I_i et du rayon de courbure r, la combinaison des équations 5.14 et 5.18 donne:

$$\sum_{i=1}^{n} M_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{E_i I_i}{r} = \sum_{i=1}^{n-1} - l_i P_i \tag{5.20}$$

d'où $$\sum_{i=1}^{n-1} l_i P_i + \sum_{i=1}^{n} \frac{E_i I_i}{r} = 0 \tag{5.21}$$

Cette équation montre qu'à l'équilibre, la somme des moments est nulle. D'autre part, la continuité de la déformation à l'interface de deux couches adjacentes i et i+1 conduit à (n-1) équations de type:

$$\frac{\sigma_i}{E_i} + \frac{P_i}{E_i t_i b_i} + \frac{t_i}{2r} = \frac{\sigma_{i+1}}{E_{i+1}} + \frac{P_{i+1}}{E_{i+1} t_{i+1} b_{i+1}} - \frac{t_{i+1}}{2r} \tag{5.22}$$

Cette équation correspond à l'expression généralisée à n-couches de l'équation 5.5 présentée précédemment pour un système à 2 couches. On retrouve de chaque côté de cette équation, les différentes composantes de la déformation due à la contrainte interne résiduelle dans le film σ_i, à la force axiale P_i qui résulte de l'attachement aux couches adjacentes, ainsi qu'à la courbure (rayon de courbure r). Utilisons, pour une couche i, la notation suivante:

$$s_i = E_i t_i b_i \tag{5.23}$$

L'équation 5.22 peut donc être re-écrite sous la forme:

$$\frac{P_i}{s_i} - \frac{P_{i+1}}{s_{i+1}} + \frac{1}{2r} (t_i + t_{i+1}) = \frac{\sigma_{i+1}}{E_{i+1}} - \frac{\sigma_i}{E_i} \tag{5.24}$$

$$\Leftrightarrow \qquad s_{i+1}P_i - s_iP_{i+1} + \frac{1}{2r}(t_i + t_{i+1}) \cdot s_i s_{i+1} = \left(\frac{\sigma_{i+1}}{E_{i+1}} - \frac{\sigma_i}{E_i}\right) \cdot s_i s_{i+1} \tag{5.25}$$

pour i = 1,2,...,(n-1)

Les équations 5.13, 5.21 et 5.25 constituent un système de (n+1) équations à (n+1) inconnues de déterminant Δ non nul qui peut être représenté sous la forme matricielle suivante:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 0 \\ s_2 & -s_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & (t_1+t_2)\cdot s_1 s_2 \\ 0 & s_3 & -s_2 & \dots & 0 & 0 & (t_2+t_3)\cdot s_2 s_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & s_n & -s_{n-1} & (t_{n-1}+t_n)\cdot s_{n-1} s_n \\ l_1 & l_2 & l_3 & \dots & l_{n-1} & 0 & 2\sum_{i=1}^{n} E_i I_i \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \dots \\ P_n \\ \frac{1}{2r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \left(\frac{\sigma_2}{E_2} - \frac{\sigma_1}{E_1}\right)\cdot s_1 s_2 \\ \left(\frac{\sigma_3}{E_3} - \frac{\sigma_2}{E_2}\right)\cdot s_2 s_3 \\ \dots \\ \left(\frac{\sigma_n}{E_n} - \frac{\sigma_{n-1}}{E_{n-1}}\right)\cdot s_{n-1} s_n \\ 0 \end{pmatrix}$$

Ce système a une solution unique donnée par les formules de Cramer. On peut donc obtenir le rayon de courbure r en résolvant l'équation:

$$\frac{1}{2r} = \frac{\Delta_{n+1}}{\Delta} \tag{5.26}$$

où Δ_{n+1} correspond au déterminant de la matrice où la colonne des coefficients de 1/2r est remplacée par celle des seconds membres. Le rayon de courbure peut donc être calculé à partir de l'expression suivante:

$$r = \frac{1}{2} \cdot \frac{\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 0 \\ s_2 & -s_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & (t_1+t_2)\cdot s_1 s_2 \\ 0 & s_3 & -s_2 & \dots & 0 & 0 & (t_2+t_3)\cdot s_2 s_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & s_n & -s_{n-1} & (t_{n-1}+t_n)\cdot s_{n-1} s_n \\ l_1 & l_2 & l_3 & \dots & l_{n-1} & 0 & 2\sum_{i=1}^{n} E_i I_i \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 0 \\ s_2 & -s_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \left(\frac{\sigma_2}{E_2} - \frac{\sigma_1}{E_1}\right)\cdot s_1 s_2 \\ 0 & s_3 & -s_2 & \dots & 0 & 0 & \left(\frac{\sigma_3}{E_3} - \frac{\sigma_2}{E_2}\right)\cdot s_2 s_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & s_n & -s_{n-1} & \left(\frac{\sigma_n}{E_n} - \frac{\sigma_{n-1}}{E_{n-1}}\right)\cdot s_{n-1} s_n \\ l_1 & l_2 & l_3 & \dots & l_{n-1} & 0 & 0 \end{vmatrix}} \tag{5.27}$$

Nous retrouvons l'expression du rayon de courbure en fonction des contraintes internes pour une structure multi-couche publié par Cao *et al.* [92]. L'application pour n = 2 de l'équation 5.27 permet de retrouver l'expression 5.5 du rayon de courbure obtenu d'après le modèle bimorphe. La modélisation multimorphe établie dans cette section correspond donc bien à une généralisation à n-couches du modèle bicouche utilisé pour la conception du microactuateur.

5.2.4.2 Modélisation à n = 3 couches de la déflexion initiale du microactuateur

Afin de vérifier la validité du modèle à n-couches, nous l'appliquons au cas du microactuateur pour déterminer sa déflexion initiale en fonction de ses contraintes internes. Étant donné que le procédé CMOS est soumis à des clauses de confidentialité, nous utilisons un modèle simplifié du microactuateur en considérant qu'il est composé essentiellement de trois couches minces: SiO_2 (pour l'ensemble ACT-CON-V1A), Al et PAS. Le tableau 5.2 présente les propriétés physiques des matériaux utilisés pour cette modélisation à n = 3 couches du microactuateur. Étant donné que la largeur de la poutre est beaucoup plus grande que son épaisseur, la structure est également soumise à une contrainte biaxiale, i.e. selon les axes (O,x) et (O,y). Afin de tenir compte de cette contrainte biaxiale, dont nous avons observé les effets à la figure 5.1-b, nous avons remplacé les modules d'Young E_i par leur expression tenant compte du coefficient de poisson ν_i, soit $E_i/(1-\nu_i)$ [93]. Les modules d'Young E_i et les coefficients de poisson ν_i proviennent de publications [5,74,94] alors que les épaisseurs e_i correspondent à celles mesurées au chapitre 4. Les contraintes σ_i du tableau 5.2 correspondent approximativement aux valeurs communiquées par la fonderie à la fin de ce projet de doctorat. Pour tenir compte de la longueur effective de la structure libérée, nous avons effectué un décalage $\Delta x = 33$ µm de la courbe de déflexion expérimentale $z = f(x)$.

Tableau 5.2: Caractéristiques des couches minces du microactuateur trimorphe [74]

numéro de la couche i	couche mince	module d'Young E_i(GPa)	coefficient de Poisson υ_i	contrainte interne σ_i (MPa)	épaisseur e_i (µm)
3	PAS	146	0,25	-50	1,4
2	Al	69	0,33	200	0,8
1	SiO_2	74	0,17	-300	2,56

La figure 5.11 présente la courbe de déflexion du microactuateur, obtenue en utilisant le modèle à n = 3 couches ainsi que les mesures expérimentales du profil de déflexion initiale de la figure 5.4.

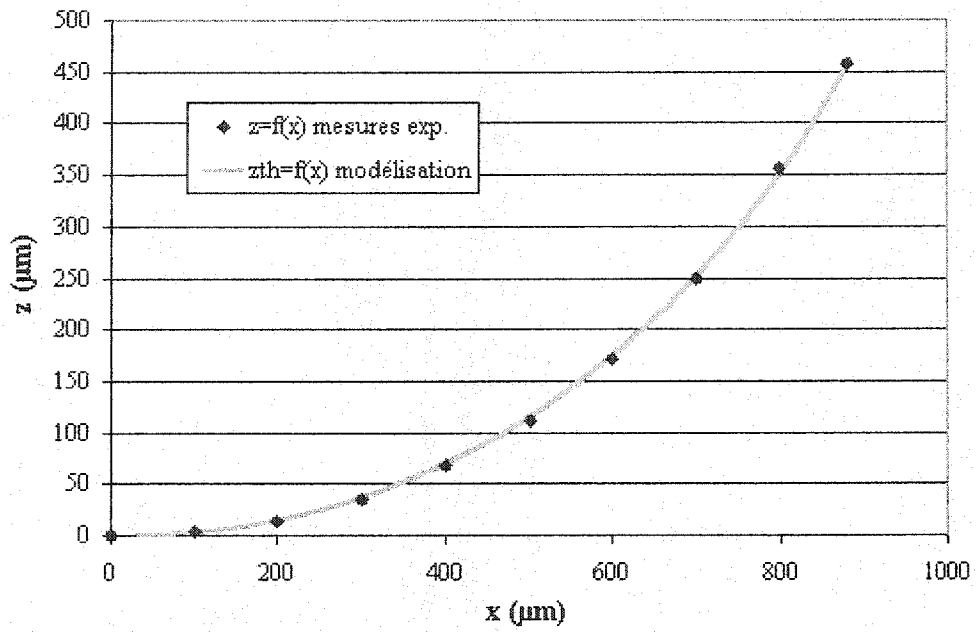


Figure 5.11: Profil de déflexion du microactuateur SiO_2-Al-PAS avec σ_1 = -300 MPa, σ_2 = 200 MPa et σ_3 = -50 MPa simulé à l'aide du modèle à n = 3 couches de la déflexion initiale et profil de déflexion obtenu avec les mesures expérimentales.

Malgré les incertitudes sur les grandeurs physiques E_i et ν_i caractérisant les matériaux du procédé, ainsi que sur les épaisseurs e_i des couches minces, la figure 5.11 montre que la simulation de la déflexion théorique initiale $z_{th} = f(x)$ permet de retrouver le profil de déflexion expérimental $z = f(x)$ ceci en utilisant les contraintes internes données par la fonderie. Compte tenu de l'incertitude de ± 3 µm sur les mesures expérimentales, en plus des incertitudes sur les paramètres mécaniques et géométriques utilisés pour la simulation, la correspondance entre les courbes théorique et expérimentale de la déflexion initiale est très satisfaisante. Par ailleurs, nous pouvons conclure que l'addition de la couche de passivation permet de réduire la déflexion initiale du microactuateur. Par son module d'Young plus élevé que celui des autres matériaux et son épaisseur, la couche de passivation augmente la rigidité EI de la structure. En effet, en faisant varier l'épaisseur de cette couche de 0,6 à 2 µm, la déflexion maximale simulée décroît de 573 µm à 385 µm. D'autre part, compte tenu de sa position sur la partie supérieure du

microactuateur et de sa contrainte interne en compression, la couche de passivation a tendance à faire défléchir la structure vers le bas contrairement aux deux autres couches. L'excellente superposition des données expérimentales et simulées de la figure 5.11 permet de vérifier la validité du modèle à n = 3 couches pour le calcul de la déflexion initiale du microactuateur en fonction des contraintes internes dans ses couches.

5.2.4.3 Simulation par éléments finis de la déflexion initiale du microactuateur

Une simulation par éléments finis (Ansys) de la déflexion initiale de la structure trimorphe, illustrée sur la figure 5.12, a été effectuée en utilisant les paramètres du tableau 5.2. Le microactuateur, dessiné en 2D, comporte la couche mince d'aluminium aux emplacements des bilames et du pad court-circuiteur, recouverte par la couche de passivation. L'utilisation des valeurs de contraintes fournies par la fonderie (tableau 5.2) permet de retrouver l'ordre de grandeur de la déflexion initiale du microactuateur. Cette simulation par éléments finis montre donc que la structure défléchit dans la même direction avec un déplacement similaire à celui donné par le modèle à 3 couches. Le modèle analytique à n-couches, développé dans la section 5.2.4.1 permet donc de modéliser la déflexion initiale du microactuateur multimorphe en permettant de retrouver les résultats expérimentaux et s'accordant à ceux obtenus avec une simulation par éléments finis.

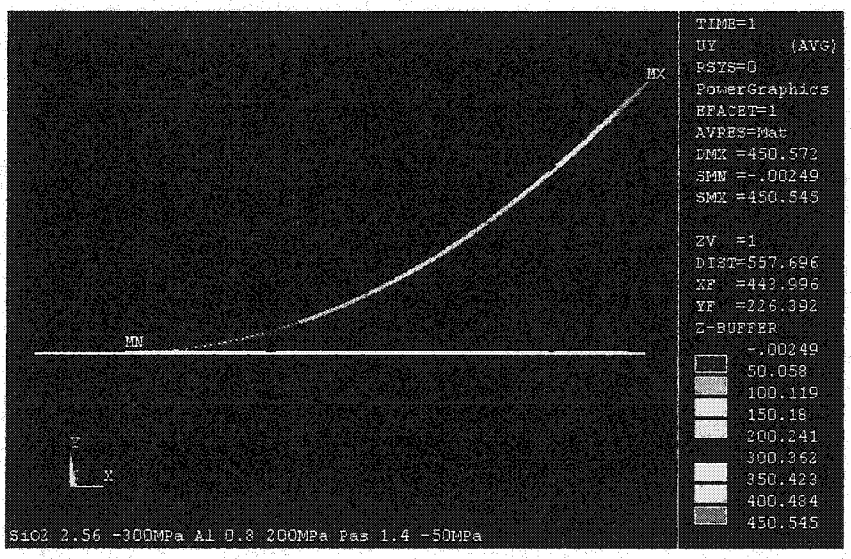


Figure 5.12: Profil de la déflexion initiale du microactuateur SiO_2-Al-PAS selon une simulation par éléments finis (Ansys).

5.2.4.4 Influence de la variation des contraintes internes sur la déflexion initiale

L'application des contraintes internes σ_1 = -300 MPa, σ_2 = 200 MPa et σ_3 = -50 MPa nous a permis de retrouver la déflexion initiale du microactuateur. Les déflexions obtenues en faisant varier la valeur de la contrainte d'une couche mince, tout en maintenant les autres paramètres constants, sont présentées sur la figure 5.13. Par exemple, dans le cas de la courbe identifiée "SiO_2", la contrainte σ_1 varie entre -400 MPa et +100 MPa tandis que σ_2 et σ_3 sont maintenus à leurs valeurs initiales respectives de 200 MPa et de -50 MPa. On observe que la contrainte qui exerce le plus d'influence sur la déflexion initiale de la structure est celle de la couche d'oxyde. En effet, la déflexion maximale varie de 576 µm pour σ_1 = -400 MPa jusqu'à -200 µm soit en dessous du niveau de la butée pour σ_1 = +100 MPa. Ces déflexions maximales sont moins élevées que celles obtenues dans le cas de la structure bimorphe pour les mêmes valeurs de contraintes, à cause de la présence de la couche de passivation. Comparativement à la figure 5.9, la variation de la contrainte σ_2 dans l'Al a peu d'influence sur la déflexion initiale de la structure. En effet, lorsque σ_2 varie entre 300 MPa et -200 MPa, la structure défléchit seulement de 20 µm. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'aluminium est la couche de plus faible épaisseur qui se retrouve "coincée" entre deux couches 2 à 3 fois plus épaisses. La courbe "PAS" (en fonction de σ_3) montre que la couche de passivation peut aider à réduire la déflexion initiale de la structure. Une déflexion maximale de 565 µm (pour σ_3 = 150 MPa) peut être réduite de 310 µm en appliquant une contrainte en compression σ_3 de -350 MPa. Effectivement du fait de sa position sur la partie supérieure de la structure, on s'attend à ce que la couche PAS en compression entraîne une courbure du microactuateur vers le bas.

La courbe identifiée "SiO_2 Ansys" est obtenue en faisant varier la contrainte σ_1 dans la couche de SiO_2 lors de simulations par éléments finis à l'aide du logiciel Ansys. La similitude entre les courbes "SiO_2 modélisation" et "SiO_2 Ansys" vient confirmer la validité de notre modèle analytique de la déflexion initiale du microactuateur. Sur la figure 5.13, nous avons également indiqué la déflexion initiale d_{init} mesurée pour le microactuateur trimorphe (voir figure 5.4). Notre modèle retrouve cette valeur expérimentale $d_{init} \sim 450$ µm pour σ_1 = -300 MPa, σ_2 = +200 MPa et σ_3 = -50 MPa, des valeurs qui correspondent bien aux contraintes communiquées par la fonderie. Ceci permet de valider expérimentalement notre modèle analytique.

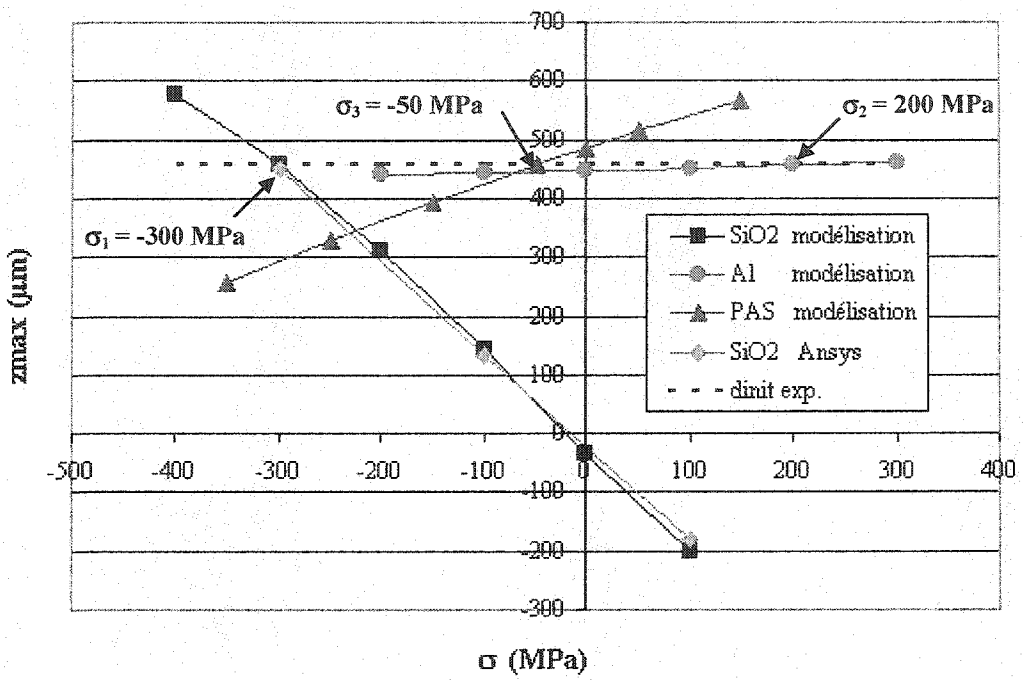


Figure 5.13: Déflexions maximales du microactuateur SiO_2-Al-PAS en fonction de la contrainte dans chacune des couches minces, simulées avec le modèle à n = 3 couches de la déflexion initiale et le logiciel Ansys.

5.2.5 Force de contact et contrainte maximale de la microstructure défléchie

Compte tenu de la complexité du design du microactuateur, composé de plusieurs couches minces non uniformément réparties sur la longueur de la structure, il est difficile de déterminer de façon analytique la force générée à l'extrémité de la structure. Nous utilisons donc un modèle simplifié pour déterminer la force générée par une poutre équivalente en oxyde qui est le matériau le plus important de la structure en porte-à-faux. Pour cela, nous utilisons l'équation 2.13 afin de déterminer la force maximale normale F_{max} générée par une poutre de longueur L, de largeur b, d'épaisseur t et de déflexion maximale z_{max}, soit:

$$F_{max} = \frac{Ebt^3 z_{max}}{4L^3} \quad [N] \tag{5.28}$$

La contrainte maximale de surface, en considérant que l'axe neutre de la poutre équivalente homogène se situe à la distance z = t/2, s'exprime par:

$$\sigma_{max} = \frac{-Mz}{I} = \frac{-F_{max} Lt}{2I} \tag{5.29}$$

Utilisons l'expression du moment d'inertie de la poutre (équation 2.8):

$$I = \frac{bt^3}{12} \tag{5.30}$$

La contrainte maximale au niveau de la partie attachée de la poutre est donc donnée par:

$$\sigma_{max} = \frac{6F_{max}L}{bt^2} \tag{5.31}$$

En appliquant les équations 5.28 et 5.31 pour une poutre de longueur L = 1009 µm, de largeur b = 145 µm, d'épaisseur t = 4,76 µm avec une déflexion verticale z_{max} = 458 µm et un module d'Young E = $69 \cdot 10^9 N/m^2$, la force générée et la contrainte maximale sont de F_{max} = 120,2 µN et σ_{max} = -221,6 MPa.

Nous avons effectué une simulation par éléments finis afin de confirmer ces estimations de la force de contact et de la contrainte maximale. La figure 5.14-a montre que la poutre équivalente avec les dimensions utilisées pour le calcul numérique, défléchit effectivement de 458 µm lorsqu'une force de 120,2 µN est appliquée à son extrémité. Tandis que le gradient de la contrainte (figure 5.14-b) au niveau de la partie attachée de la poutre indique une contrainte maximale de -221,6 MPa. Étant donné que la poutre effectue une déflexion verticale vers le haut, une contrainte maximale située sur la fibre supérieure de la poutre était attendue. La figure 5.15 indique l'ordre de grandeur des forces générées selon la déflexion maximale initial de la structure selon l'équation 5.28.

Au moyen d'une pointe en diamant d'un profilomètre (Dektak), nous avons appliqué une force verticale contrôlée au niveau du pad court-circuiteur afin d'observer la déflexion de la structure. De sa position initiale à 458 µm jusqu'au fond de la cavité, la structure défléchit en augmentant la force appliquée jusqu'à la valeur maximale de 50 mg permise par le profilomètre. Ces tests montrent que la structure défléchie de façon reproductible sans modification de sa déflexion initiale après le retrait de la force appliquée.

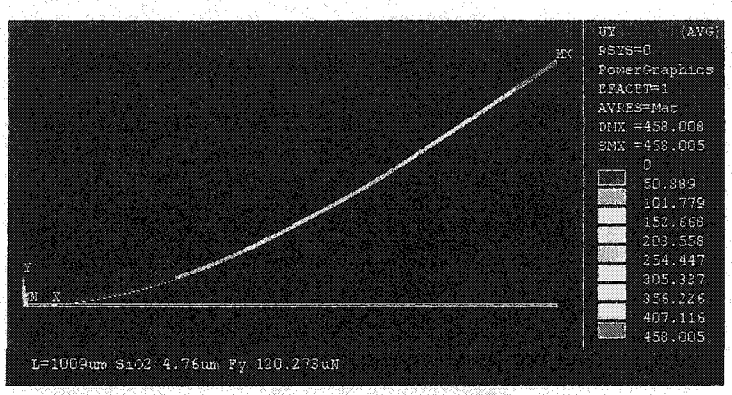


Figure 5.14: Simulations par éléments finis pour une poutre en SiO_2 soumise à une force de 120,2 µN à son extrémité du: a) profil de déflexion avec d_{max} = 458 µm et b) du gradient de la contrainte σ_x vers la partie attachée de la poutre avec σ_{max} = -221,6 MPa.

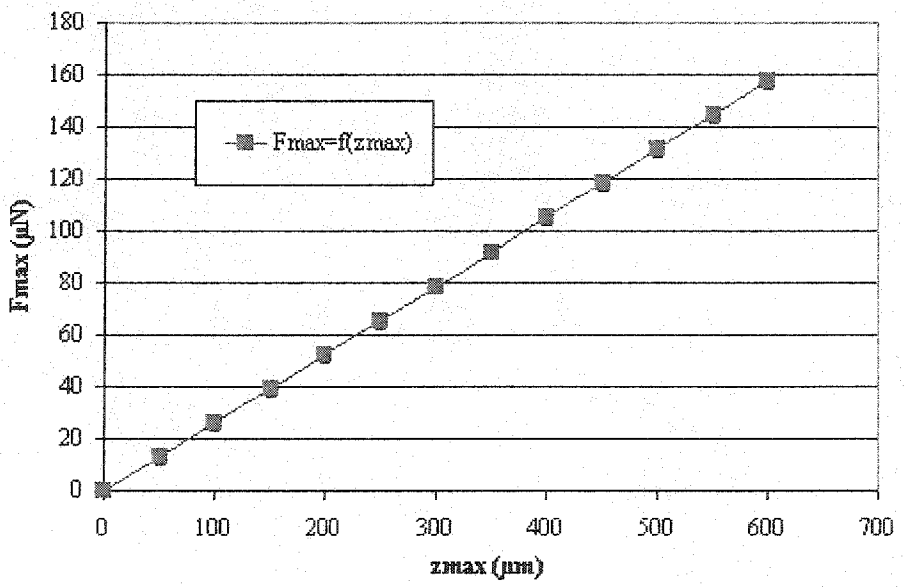


Figure 5.15: Force générée en fonction de la déflexion maximale initiale de la structure.

5.3 Tests d'actuation et modélisation du microactuateur

5.3.1 Tests d'actuation du microactuateur électro-thermo-mécanique

5.3.1.1 Montage expérimental pour les tests d'actuation

Les tests d'actuation sur les bilames A et B ont été effectués au moyen d'un analyseur de paramètres semi-conducteurs (Hewlett Packard 4155A) relié à une station de mesures sous pointes (Micromanipulator) présentés sur la figure 5.16. Nous avons placé les pointes conductrices directement sur les lignes d'entrée des résistances de chauffage ainsi que sur le plot de mise à la masse reliant toutes les lignes de sorties des bilames. L'analyseur de paramètres est employé en mode balayage pour faire varier linéairement le courant I ou la tension V permettant le chauffage des bilames. La déflexion de l'extrémité de la poutre est mesurée au moyen du microscope optique de la station sous pointes et de sa vis micrométrique. La déflexion verticale, résultant de l'actuation du microactuateur, est mesurée en effectuant une mise au point sur l'extrémité de la structure dans sa position initiale puis lorsque celle-ci est chauffée. Un calibrage de la vis micrométrique utilisée pour effectuer la mise en point permet de mesurer la déflexion de la structure.

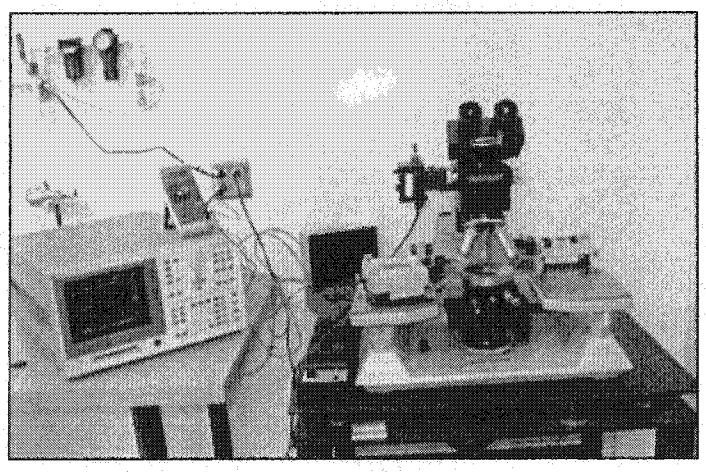


Figure 5.16: Station sous pointes reliée à un analyseur de paramètres semiconducteurs utilisée pour les tests d'actuation.

Il est à noter que les tests d'actuation ont été effectués sur les microactuateurs du design ICBPMAT5 encore recouverts de la couche de passivation.

Nous avons observé au cours des tests d'actuation que la déflexion d de la poutre croit approximativement de façon linéaire avec la puissance appliquée P_i, dans ce cas, notons γ_i le facteur de conversion tel que [74]:

$$d = \gamma_i \cdot P_i \tag{5.32}$$

Rappelons que la puissance électrique, dissipée par effet joule, est utilisée pour augmenter la température de la région chauffée. Afin de maintenir cette température constante, une puissance électrique continue est nécessaire pour compenser les pertes de puissance thermique dans l'environnement. Étant donné la complexité des conditions aux limites concernant les transferts de chaleur dans le substrat, dans l'air ambiant et par radiation, ce facteur de conversion est déterminé à partir des résultats expérimentaux obtenus durant les tests d'actuation.

5.3.1.2 Tests d'actuation sur chaque bilame du microactuateur

Pour les tests d'actuation du bilame A, l'analyseur de paramètres semi-conducteurs est programmé de manière à faire circuler un courant I_A, variant de 0 à 8 mA par incrément de 1 mA et à mesurer la tension V_A aux bornes de la résistance de chauffage. Les mesures de la déflexion d du microactuateur en fonction de la puissance incidente P_A sont présentées sur la figure 5.17. Compte tenu de l'incertitude sur les mesures de déflexion de ± 3 µm, la déflexion croît approximativement linéairement avec la puissance incidente avec un facteur de conversion γ_A = 1,8 µm/mW. Ainsi plus la température de la structure augmente par chauffage du bilame A, plus l'effet bimorphe va accentuer la courbure du microactuateur.

Les tests d'actuation du bilame B ont été effectués de façon similaire à ceux du bilame A. La figure 5.18 présente les mesures de la déflexion du microactuateur en fonction de la puissance électrique P_B. La déflexion croît approximativement linéairement avec la puissance incidente avec un facteur de conversion γ_B = 1,6 µm/mW qui est 11% inférieure à la valeur obtenue pour γ_A. Par exemple, pour obtenir une déflexion de -30 µm de la structure, une puissance P_B de 20 mW est nécessaire en chauffant uniquement le bilame B, tandis qu'une puissance P_A de l'ordre de 16 mW permet d'obtenir la même déflexion. Par conséquent, le design du bilame A permet de produire de plus grandes déflexions verticales que le bilame B.

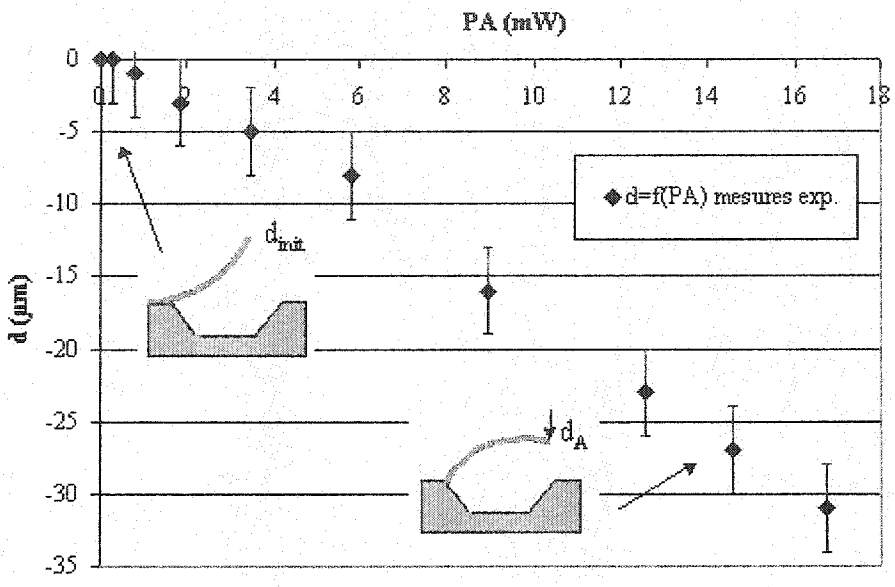


Figure 5.17: Mesures expérimentales de la déflexion d du microactuateur en fonction de la puissance incidente P_A utilisée pour le chauffage du bilame A.

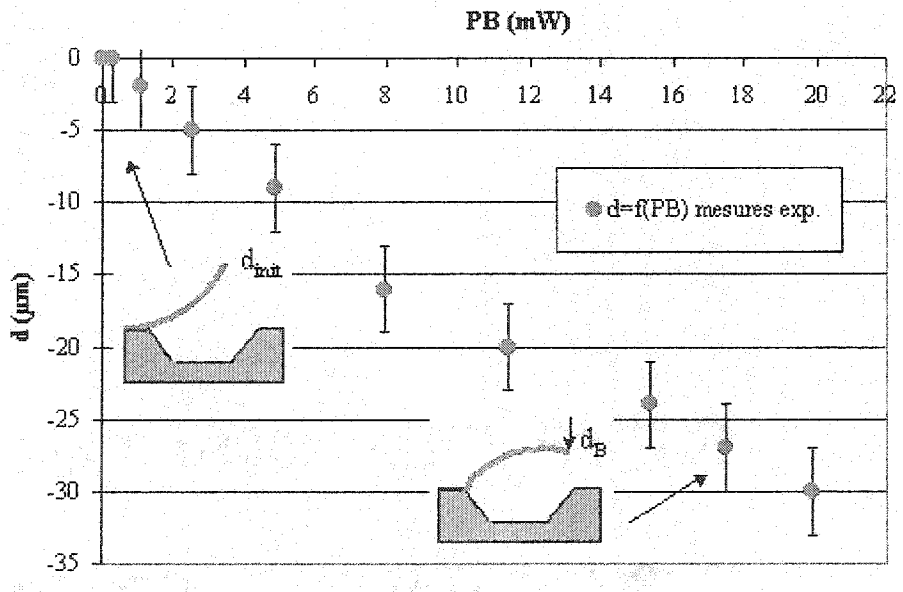


Figure 5.18: Mesures expérimentales de la déflexion d du microactuateur en fonction de la puissance incidente P_B utilisée pour le chauffage du bilame B.

5.3.1.3 Tests d'actuation des bilames A et B activés simultanément

Les tests d'actuation des bilames A et B activés simultanément donnent une déflexion en fonction de la puissance totale incidente $P_T = P_A+P_B$ illustrée à la figure 5.19. Sur la première partie de la courbe, seul le bilame A est chauffé en augmentant le courant I_A jusqu'à 8 mA correspondant à une déflexion de -31 µm. Sur la seconde partie de la courbe, la puissance P_A est maintenue à 16,7 mW, tandis que le bilame B est à son tour chauffé en augmentant le courant I_B jusqu'à 8 mA. La déflexion de la structure lorsque P_B = 22,1 mW en plus de P_A = 16,7 mW est de -60 µm. La courbe de la figure 5.19 montre que la déflexion de la structure continue de croître à peu près linéairement en fonction de la puissance P_T appliquée. Le chauffage simultané des bilames permet donc d'atteindre des températures plus élevées dans la structure et de ce fait, de plus grandes déflexions.

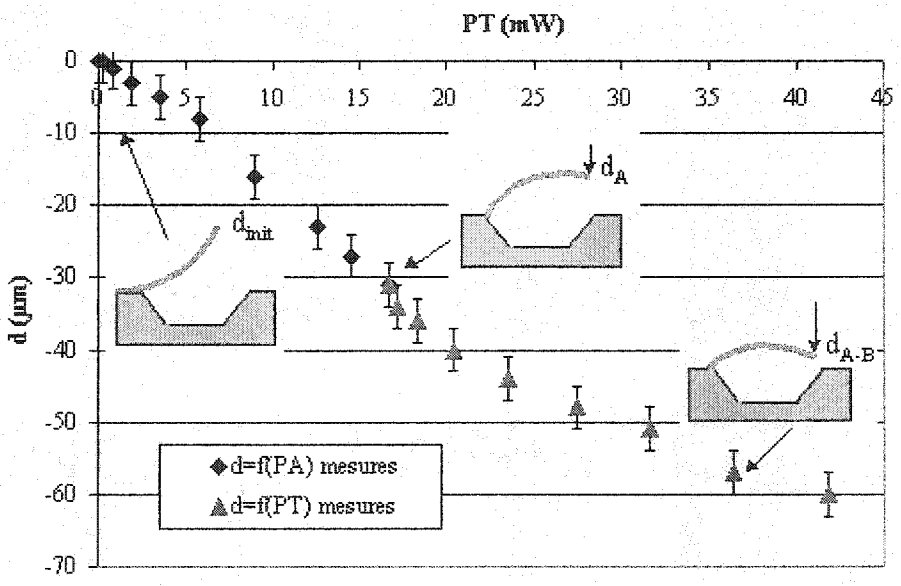


Figure 5.19: Mesures expérimentales de la déflexion d du microactuateur en fonction de la puissance incidente totale P_T utilisée pour le chauffage simultané des bilames A et B.

Le fonctionnement bistable de l'actuateur n'a pu être démontré expérimentalement à cause de son importante déflexion initiale qui est le résultat de couches minces CMOS fortement contraintes. Le design du microactuateur n'a pas été conçu de manière à réaliser d'aussi grandes déflexions. De plus, si la présence de la couche de passivation permet de diminuer la déflexion initiale de la structure, elle est également responsable de ses faibles amplitudes d'actuation en réduisant l'effet bimorphe de la double couche SiO_2-Al.

5.3.2 Modélisation de l'actuation thermique d'une structure bimorphe

5.3.2.1 Rayon de courbure en fonction de ΔT et des contraintes internes σ_1 et σ_2

Nous avons présenté dans la section 5.2.3 une modélisation de la déflexion initiale d'une structure bimorphe en fonction des contraintes internes σ_1 et σ_2. Déterminons l'expression du rayon de courbure d'une structure bicouche en fonction d'une augmentation de température ΔT et de ses contraintes internes. Afin d'assurer la continuité de la déformation à l'interface entre les deux couches minces, l'équation 5.5 est modifiée de manière à tenir compte de la variation en température ΔT, ce qui conduit à:

$$\alpha_1 \Delta T + \frac{\sigma_1}{E_1} + \frac{P}{E_1 t_1 b_1} - \frac{t_1}{2r} = \alpha_2 \Delta T + \frac{\sigma_2}{E_2} - \frac{P}{E_2 t_2 b_2} + \frac{t_2}{2r} \tag{5.33}$$

où les termes $\alpha_i \Delta T$ correspondent à l'allongement de chaque matériau i relié à de leur coefficient d'expansion thermique α_i. En tenant compte de l'orientation des moments positifs (figure 5.5), la force induite P en fonction du rayon de courbure r s'exprime par:

$$P = -\frac{2(EI)_{\text{équiv}}}{(t_1 + t_2) \cdot r} \tag{5.34}$$

En combinant les équations 5.33 et 5.34, nous pouvons déduire une expression du rayon de courbure d'une structure bimorphe qui tient compte de sa déflexion initiale et de son actuation thermique:

$$r = -\frac{\left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right) + \frac{2(EI)_{\text{équiv}}}{t_1 + t_2} \cdot \left(\frac{1}{E_1 b_1 t_1} + \frac{1}{E_2 b_2 t_2}\right)}{\frac{\sigma_2}{E_2} - \frac{\sigma_1}{E_1} + (\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T} \tag{5.35}$$

Cette équation, combinée à l'équation 5.11 permet de tracer le profil de déflexion d'une structure bimorphe en tenant compte de ses contraintes internes σ_i et de l'augmentation de sa température ΔT. Elle s'applique à un bilame homogène tel que le bilame A ou B.

5.3.2.2 Modélisation bimorphe de l'actuation thermique du microactuateur

L'application de l'équation 5.35, sur chaque longueur δx du microactuateur donne les résultats de déflexion maximale en fonction du chauffage des bilames A et B présentés sur la figure 5.21. La procédure utilisée pour tracer la courbe de déflexion du microactuateur sera

expliquée plus en détail dans la section 5.3.3. Ces résultats de simulation ont été obtenus avec les contraintes σ_1 = -172 MPa et σ_2 = 100 MPa dans les couches de SiO_2 et d'Al pour obtenir une déflexion initiale de 456 µm correspondant approximativement à celle observée pour les microstructures libérées. De cette façon, il sera possible de comparer dans la section 5.3.3 les déflexions verticales obtenues pour un microactuateur bimorphe ou trimorphe (tenant compte de la couche de passivation) à partir d'une même déflexion initiale. La figure 5.20 démontre que l'utilisation de ces deux couches uniquement permettrait de réaliser de grandes déflexions verticales en utilisant des températures inférieures à 200°C. Pour une même température de chauffage, il apparaît que le bilame A permettrait une déflexion verticale supérieure à celle obtenue avec le bilame B résultant de son design. Nous observons que l'écart entre les déflexions maximales calculées croit avec la température. Pour ΔT_A = 200°C, l'extrémité de la structure passerait en dessous du niveau de la butée (si elle n'était pas présente) avec déflexion de -24,4 µm. Tandis que pour la même température de chauffage du bilame B, l'extrémité du microactuateur descendrait à z = +5,5 µm. Le bilame A serait donc plus efficace que le bilame B pour faire défléchir le microactuateur verticalement en consommant moins de puissance électrique tel qu'observé sur les figures 5.17 et 5.18.

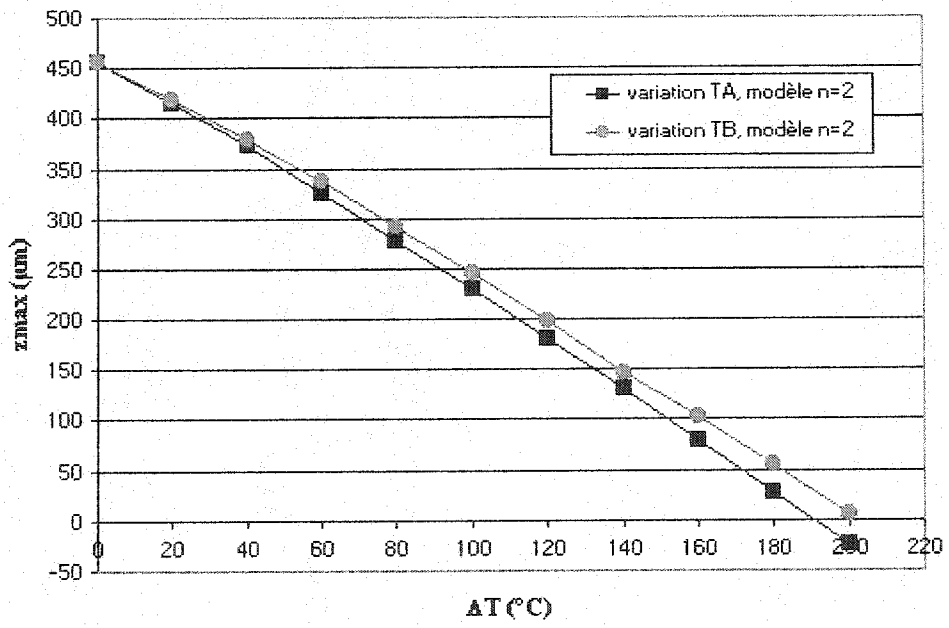


Figure 5.20: Déflexions maximales du microactuateur en fonction du chauffage du bilame A ou B simulées à l'aide du modèle bimorphe de l'actuation thermique.

5.3.3 Modélisation de l'actuation thermique d'une structure multimorphe

5.3.3.1 Rayon de courbure en fonction de ΔT et des contraintes internes σ_i

Dans le cas d'une structure multimorphe à n-couches, avec une déflexion initiale résultant de la relaxation de ses contraintes internes σi (i = 1à n), déterminons l'expression de son rayon de courbure r en fonction d'une augmentation de température ΔT. La continuité de la déformation à l'interface entre deux couches adjacentes i et i+1 conduit à (n-1) équations de type:

$$\alpha_i \Delta T + \frac{\sigma_i}{E_i} + \frac{P_i}{E_i t_i b_i} - \frac{t_i}{2r} = \alpha_{i+1} \Delta T + \frac{\sigma_{i+1}}{E_{i+1}} + \frac{P_{i+1}}{E_{i+1} t_{i+1} b_{i+1}} + \frac{t_{i+1}}{2r} \tag{5.36}$$

En utilisant la notation 5.23, l'équation 5.36 devient:

$$\frac{P_i}{s_i} - \frac{P_{i+1}}{s_{i+1}} - \frac{1}{2r}(t_i + t_{i+1}) = \frac{\sigma_{i+1}}{E_{i+1}} - \frac{\sigma_i}{E_i} + (\alpha_{i+1} - \alpha_i)\Delta T \tag{5.37}$$

$$\Leftrightarrow \qquad s_{i+1} P_i - s_i P_{i+1} - \frac{1}{2r}(t_i + t_{i+1}) \cdot s_i s_{i+1} = [(\frac{\sigma_{i+1}}{E_{i+1}} - \frac{\sigma_i}{E_i}) + (\alpha_{i+1} - \alpha_i)\Delta T] \cdot s_i s_{i+1} \tag{5.38}$$

pour i = 1,2,…,(n-1).

Les équations 5.13, 5.21 et 5.38 constituent un système de (n+1) équations à (n+1) inconnues de déterminant Δ non nul qui peut être représenté sous la forme matricielle suivante:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 0 \\ s_2 & -s_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & -(t_1+t_2)\cdot s_1 s_2 \\ 0 & s_3 & -s_2 & \dots & 0 & 0 & -(t_2+t_3)\cdot s_2 s_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & s_n & -s_{n-1} & -(t_{n-1}+t_n)\cdot s_{n-1} s_n \\ l_1 & l_2 & l_3 & \dots & l_{n-1} & 0 & 2\sum_{i=1}^{n} E_i I_i \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \dots \\ P_n \\ \frac{1}{2r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ [(\frac{\sigma_2}{E_2} - \frac{\sigma_1}{E_1}) + (\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T] \cdot s_1 s_2 \\ [(\frac{\sigma_3}{E_3} - \frac{\sigma_2}{E_2}) + (\alpha_3 - \alpha_2)\Delta T] \cdot s_2 s_3 \\ \dots \\ [(\frac{\sigma_n}{E_n} - \frac{\sigma_{n-1}}{E_{n-1}}) + (\alpha_n - \alpha_{n-1})\Delta T] \cdot s_{n-1} s_n \\ 0 \end{pmatrix}$$

À partir des formules de Cramer, une expression du rayon de courbure est donnée par:

$$r = \frac{1}{2} \cdot \frac{\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 0 \\ s_2 & -s_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & -(t_1+t_2)\cdot s_1 s_2 \\ 0 & s_3 & -s_2 & \dots & 0 & 0 & -(t_2+t_3)\cdot s_2 s_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & s_n & -s_{n-1} & -(t_{n-1}+t_n)\cdot s_{n-1} s_n \\ l_1 & l_2 & l_3 & \dots & l_{n-1} & 0 & 2\sum_{i=1}^{n} E_i I_i \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 0 \\ s_2 & -s_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & [(\frac{\sigma_2}{E_2}-\frac{\sigma_1}{E_1})+(\alpha_2-\alpha_1)\Delta T]\cdot s_1 s_2 \\ 0 & s_3 & -s_2 & \dots & 0 & 0 & [(\frac{\sigma_3}{E_3}-\frac{\sigma_2}{E_2})+(\alpha_3-\alpha_2)\Delta T]\cdot s_2 s_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & s_n & -s_{n-1} & [(\frac{\sigma_n}{E_n}-\frac{\sigma_{n-1}}{E_{n-1}})+(\alpha_n-\alpha_{n-1})\Delta T]\cdot s_{n-1} s_n \\ l_1 & l_2 & l_3 & \dots & l_{n-1} & 0 & 0 \end{vmatrix}} \qquad (5.39)$$

Pour n = 2 l'équation 5.39 permet de retrouver l'expression 5.35 du rayon de courbure obtenu via le modèle bimorphe. Une continuité est donc assurée entre la modélisation bimorphe et celle à n-couches.

5.3.3.2 Modélisation à n = 3 couches de l'actuation thermique du microactuateur

Nous utilisons la modélisation de l'actuation thermique d'une structure à n-couches (section 5.3.3.1) au cas du microactuateur simplifié à n = 3 couches. Les propriétés physiques des matériaux sont celles qui ont été présentées au tableau 5.2. Pour calculer la déflexion du microactuateur durant son actuation, nous avons effectué une discrétisation en divisant sa longueur L en N portions de longueur dx (avec N = 1000 pour nos simulations). Nous considérons que chaque portion dx est à une température constante et donc caractérisée par un rayon de courbure constant. La température de chaque portion δx est calculée à partir du modèle thermique établi dans la section 2.4.4, en l'appliquant pour une structure à 3 couches. Pour les différentes sections du microactuateur, nous avons calculé une conductivité thermique équivalente k_{eq} obtenue à partir de la conductance thermique équivalente G_{eq}. Rappelons que pour une portion de la structure de longueur L, composée de n couches minces de même longueur $L_i = L$, chacune caractérisée par une section d'aire A_i et une conductivité thermique k_i, la conductance thermique équivalente G_{eq} peut s'exprimer sous la forme:

$$G_{eq} = \frac{k_{eq} \cdot A_{eq}}{L} = \sum_{i=1}^{n} \frac{k_i \cdot A_i}{L_i} \qquad (5.40)$$

Le tableau 5.3 présente les conductivités thermiques des différents matériaux utilisés pour cette modélisation ainsi que celle de l'air ambiant situé sous la structure dans une cavité d'environ 70 µm de profondeur. Pour la couche de passivation, nous avons tenu compte du fait qu'elle était formée d'une couche de SiO_2 de 0,7 µm et d'une couche de Si_3N_4 de 0,7 µm.

Tableau 5.3: Conductivité thermique des matériaux utilisés pour le modèle d'actuation à n = 3 couches du microactuateur [5,74].

matériau/milieu	coefficient d'expansion thermique α (10^{-6}/K)	conductivité thermique k (W/m·K)
Si_3N_4	2,8	18,5
Al	23	235
SiO_2	0,4	1,4
air		0,025

Pour obtenir le profil de déflexion du microactuateur lors de son actuation thermique, nous appliquons les relations de continuité entre chaque arc de cercle de rayon de courbure r_i (i = 1 à N). Le modèle analytique à n-couches de la section 5.3.3.1, a été programmé avec le logiciel Labview afin d'effectuer les simulations permettant d'obtenir les profils d'actuation du microactuateur.

L'évolution de la déflexion maximale du microactuateur en fonction de la température du bilame A ou B est illustrée sur la figure 5.21. Nous observons que les déflexions verticales calculées sont linéaires en fonction de la température et faibles comparativement aux déflexions obtenues pour un microactuateur bimorphe (voir figure 5.21). En effet, pour une augmentation de température ΔT_A = 200°C, le microactuateur effectue seulement une déflexion de -54 µm par rapport à sa position initiale. Dans le cas du microactuateur bimorphe, pour cette même augmentation de température dans le bilame A, l'extrémité du microactuateur défléchirait jusqu'en dessous du niveau de la butée avec une déflexion de -480 µm. L'addition de la couche de passivation réduit 10 fois l'amplitude de déflexion du microactuateur. Cette diminution de l'amplitude de l'actuation peut s'expliquer par le fait que la couche de passivation augmente la rigidité du microactuateur et réduit l'efficacité de l'effet bimorphe conçu au départ pour les couches SiO_2 et Al.

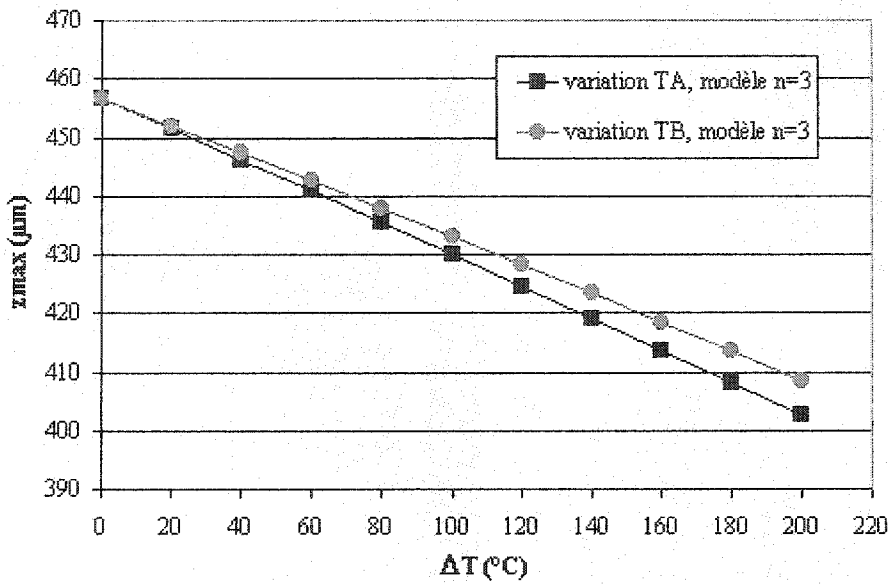


Figure 5.21: Déflexions maximales du microactuateur en fonction du chauffage du bilame A ou B simulées avec le modèle à n = 3 couches de l'actuation thermique.

La figure 5.22 présente les résultats calculés de déflexion en augmentant, dans un premier temps, la température du bilame A de 20 à 140°C. En maintenant ΔT_A à 120°C, la température dans le bilame B est ensuite augmentée de manière à observer la déflexion résultant du chauffage simultané des deux bilames. Il apparaît que la déflexion continue de croître linéairement en fonction de $(\Delta T_A+\Delta T_B)$. Nous pouvons constater que lorsque les deux bilames sont chauffés simultanément, leurs effets s'additionnent approximativement. Comparativement à la déflexion uniquement due au chauffage du bilame A, la déflexion lors de l'activation du bilame B en maintenant le chauffage du bilame A constant, se caractérise par une pente légèrement plus faible. Ceci peut s'expliquer par le fait que le chauffage bilame B induit des déflexions inférieures au bilame A. Ce comportement a aussi été observé pour la courbe expérimentale de la déflexion en fonction de la puissance appliquée (voir figure 5.19).

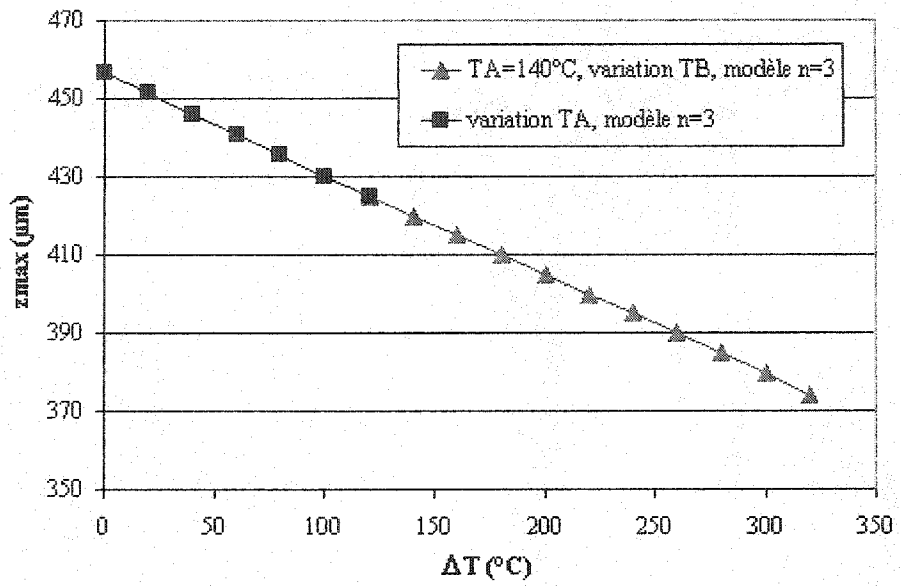


Figure 5.22: Déflexion maximale du microactuateur en fonction du chauffage du bilame A jusqu'à T_A = 140°C, puis du bilame B en maintenant ΔT_A = 120°C, selon le modèle d'actuation trimorphe.

5.3.3.3 Simulation par éléments finis de l'actuation thermique du microactuateur

Des simulations par éléments finis à l'aide du logiciel Ansys, ont été effectuées sur le microactuateur trimorphe, caractérisé par une déflexion initiale de 450,5 µm (voir figure 5.12) afin de déterminer sa déflexion d'actuation en fonction de la température de chauffage dans chaque bilame. Les résultats présentés sur la figure 5.23 montrent que, qualitativement, la déflexion du microactuateur croit toujours linéairement avec la température atteinte par chacun des bilames. Par ailleurs, nous observons que la déflexion résultant du chauffage du bilame B est toujours inférieure à celle obtenue en activant le bilame A. Quantitativement, l'amplitude de déflexion obtenue avec le logiciel Ansys diffère en moyenne de 3% des valeurs données par le modèle à n = 3 couches de la section 5.3.3.2. La figure 5.24 présente, comme exemple, le profil de déflexion du microactuateur en chauffant le bilame A (ΔT_A = 120°C). Chaque simulation thermomécanique a été précédée d'une simulation thermique donnant la distribution de température le long de la structure.

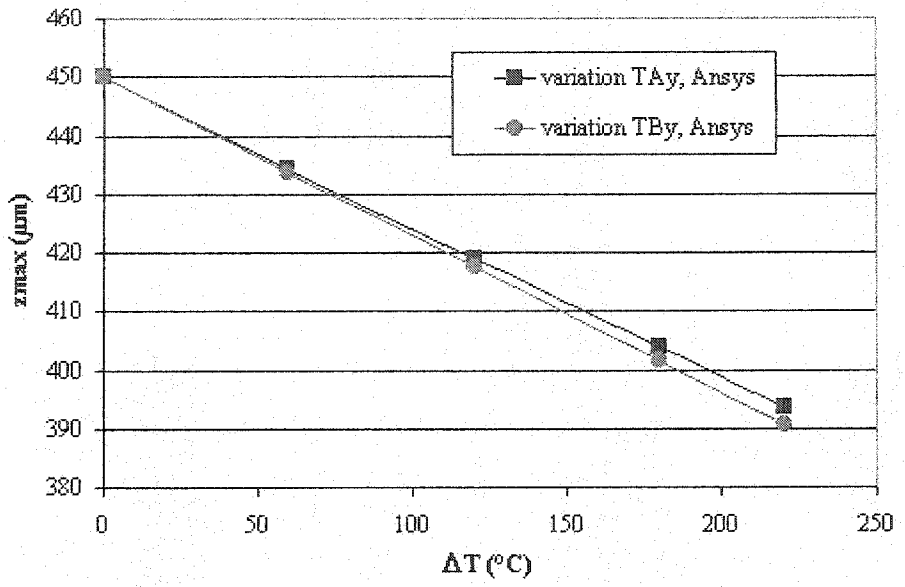


Figure 5.23: Déflexions maximales du microactuateur en fonction du chauffage du bilames A ou B selon des simulations par éléments finis (Ansys).

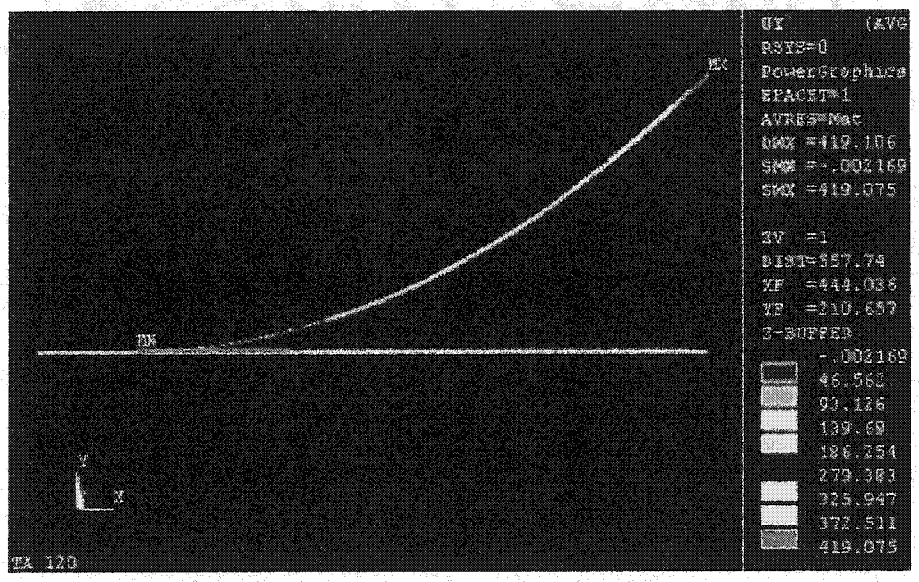


Figure 5.24: Profil de déflexion du microactuateur SiO_2-Al-PAS avec une augmentation de température dans le bilame A de $\Delta T_A = 120°C$ selon une simulation par éléments finis (Ansys).

5.3.3.4 Influence de la variation de l'épaisseur de la couche de passivation

Les simulations effectuées à l'aide du modèle analytique à n = 3 couches, appliqué au microactuateur composé des couches minces SiO_2 (t_1 = 2,56 µm), Al (t_2 = 0,8 µm) et PAS (t_3 = 1,4µm) avec des contraintes internes σ_1 = -300 MPa, σ_2 = 200 MPa et σ_3 = -50 MPa, ont donné des résultats qui ont été confirmés avec les simulations par éléments finis du logiciel Ansys. En tenant compte de l'incertitude sur l'épaisseur réelle de la couche de passivation comprise entre 1,4 et 1,9 µm (voir chapitre 4), nous avons étudié l'influence de celle-ci sur la déflexion du microactuateur. En conservant les contraintes internes et les épaisseurs t_1 et t_2 indiquées ci-dessus, la variation de l'épaisseur t_3 de 0,6 à 2 µm permet de réduire de façon significative la déflexion initiale du microactuateur de 573 à 385 µm. Nous avons appliqué la modélisation à n = 3 couches en augmentant l'épaisseur de la couche de passivation à t_3 = 1,7 µm. Afin de retrouver la déflexion initiale expérimentale, la contrainte dans la couche d'oxyde a été augmentée en compression à σ_3' = -330 MPa. La déflexion d du microactuateur en fonction de l'augmentation de température ΔT dans les bilames A et B est illustrée sur la figure 5.25 et superposée aux résultats de la figure 5.21.

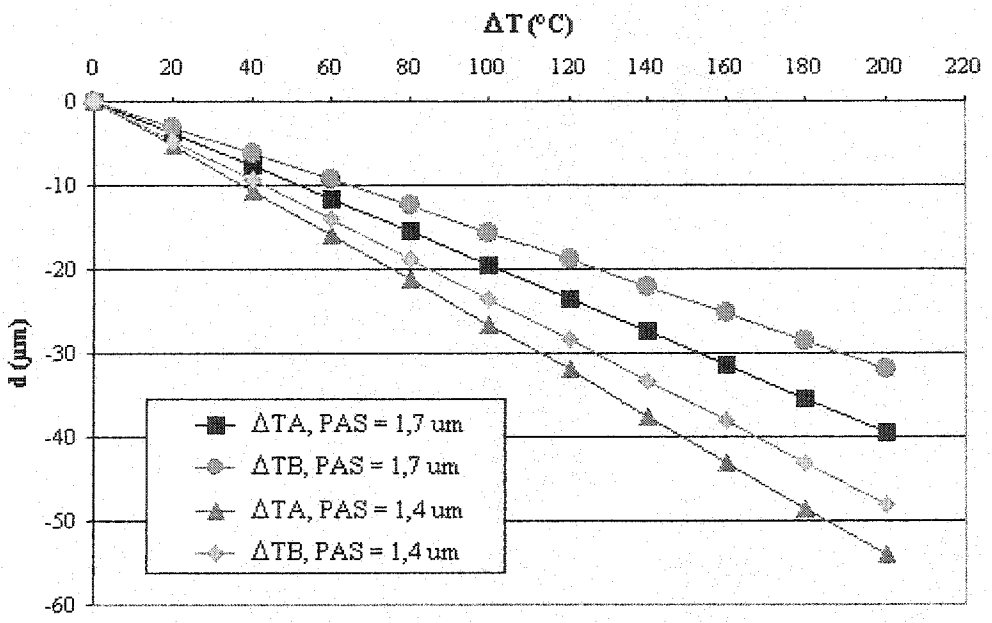


Figure 5.25: Déflexions verticales du microactuateur en fonction du chauffage des bilames A ou B et de l'épaisseur de la couche de passivation simulées avec le modèle à n = 3 couches de l'actuation thermique.

La figure 5.25 montre que les déflexions obtenues avec une couche de passivation plus épaisse sont 26% plus faibles pour le bilame A et 33% plus faibles pour le bilame B. D'une part, la couche de passivation contribue à augmenter la rigidité (EI) du microactuateur. D'autre part, plus cette couche de passivation est épaisse, plus elle réduit l'effet bimorphe de l'ensemble SiO_2/Al.

5.3.3.5 Conductances thermiques des bilames A et B

Rappelons qu'au chapitre 2, nous avons calculé les conductances thermiques théoriques des bilames A et B dans le cas d'un microactuateur bimorphe. Nous effectuons des calculs identiques appliqués au cas d'un microactuateur trimorphe pour déterminer les conductances thermiques théoriques G_{thA} et G_{thB}. Ces valeurs permettront dans la section suivante de tracer les courbes de déflexion théorique $d_{th} = f(P)$ que nous comparerons aux mesures expérimentales. Les tableaux 5.5 et 5.6 présentent les résultats obtenus pour le microactuateur comprenant les couches minces SiO_2, Al et PAS avec des épaisseurs respectives de 2,56 µm, 0,8 µm et 1,7 µm activé selon le milieu (vide ou à l'air ambiant) dans lequel il est activé.

Tableau 5.4: Conductance thermique théorique du bilame A calculée à partir de la modélisation thermique du microactuateur trimorphe.

	$G_{thA,1}$ (µW/K)	$G_{thA,2}$(µW/K)	$G_{thA,3\text{-}4}$(µW/K)	G_{thA} (µW/K) total
vide	51,4	0	0	51,4
air ambiant	55,4	16,4	22,7	94,6

Tableau 5.5: Conductance thermique théorique du bilame B calculée à partir de la modélisation thermique du microactuateur trimorphe.

	$G_{thB,1\text{-}2}$(µW/K)	$G_{thB,3}$(µW/K)	$G_{thB,4}$(µW/K)	G_{thB}(µW/K) total
vide	55,5	0	0	55,5
air ambiant	65,6	20,8	10,6	96,9

Quelque soit le milieu d'actuation, les résultats indiqués aux tableaux 5.5 et 5.6 montrent que la présence de la couche de passivation a pour effet d'augmenter les conductances thermiques des "bras gauches" des bilames chauffés (voir tableaux 2.3 et 2.5 pour la modélisation du microactuateur sans la couche de passivation). La couche de passivation a une

épaisseur de 1,7 µm ce qui augmente la section transversale du bras gauche et conduit à la dissipation de plus de chaleur vers le substrat. Pour une activation du microactuateur dans le vide, nous retrouvons que les pertes de chaleurs s'effectuent exclusivement dans les "bras gauches" des bilames. Dans l'air ambiant, les autres composantes de la conductance thermique (sous les bilames chauffés et au niveau de leurs "bras droits") sont approximativement les mêmes que celles obtenues pour le microactuateur bimorphe du fait que les pertes de chaleur s'effectuent dans la cavité d'air située en-dessous. Les conductances thermiques théoriques pour les bilames A et B sont respectivement de G_{thA} = 94,6 µW/K et G_{thB} = 96,9 µW/K. Le fait que ces conductances soient plus élevées que celles calculées au chapitre 2 dans le cas d'un microactuateur bimorphe, confirme que la présence de la couche de passivation entraîne plus de pertes de chaleur et par conséquent des températures atteintes dans les bilames plus faibles pour une même puissance appliquée.

5.3.3.6 Estimation des températures des tests d'actuation

Pour que nous puissions comparer les mesures de déflexions expérimentales avec celles obtenues à l'aide du modèle analytique (figure 5.25), nous devons déterminer la relation entre la puissance électrique P appliquée à l'augmentation de température ΔT. Comme il a été montré dans l'analyse thermique de la section 2.4.4, les termes correspondant aux flux de chaleur par conduction, convection et radiation peuvent s'écrire sous la forme d'une constante G_{thA} multipliée par ΔT_A pour de faibles variations de température. Par ailleurs, en régime permanent, la somme des pertes de chaleur est égale à la puissance électrique injectée P_{Ai} dans la résistance de chauffage R_{Ai} qui correspond à la résistance exacte du bilame A, ce qui donne:

$$P_{Ai} = \Phi_{cond} + \Phi_{conv} + \Phi_{rad} = G_{thA} \cdot \Delta T_A \tag{5.41}$$

où G_{thA} est homogène à une conductance thermique (mW/K) et caractérise l'isolation thermique du bilame A. Nous utilisons la conductance thermique théorique G_{thA}, calculée dans la section précédente à partir de notre modélisation trimorphe du microactuateur. La puissance injectée P_{Ai} est reliée à la puissance électrique appliquée P_A de la figure 5.18, suivant l'équation:

$$P_A = \frac{P_{Ai} \cdot (R_{Ai} + R_{Ac})}{R_{Ai}} = \frac{P_{Ai} \cdot R_A}{R_A - R_{Ac}} \tag{5.42}$$

où R_{Ac} est la résistance totale des lignes métalliques reliant la source d'alimentation au bilame A additionné de la résistance des aiguilles de la station sous pointes. Cette équation est obtenue en

considérant que les résistances R_{Ac} et R_{Ai} constituent un pont diviseur de tension tel qu'illustré sur la figure 5.26.

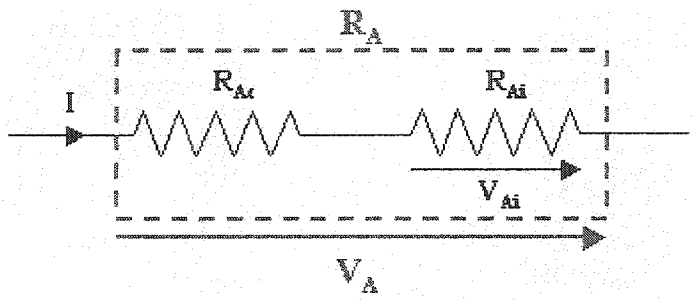


Figure 5.26: Pont diviseur composé des résistances R_{Ac} et R_{Ai} telles que $R_A = R_{Ac}+R_{Ai}$.

Nous effectuons l'hypothèse que, pour de faibles variations de température, la résistance électrique croit linéairement [95] avec la température suivant l'équation:

$$R_A = R_{Ac} + R_{Ai(20°C)}(1 + \beta \cdot \Delta T_A) \tag{5.43}$$

où β = 0,0036 ohm/K est le coefficient de variation de la résistance de l'aluminium fonction de la température [6]. Pour l'équation 5.43 appliquée aux bilames A et B nous utilisons les résistances $R_{Ai(20°C)}$ = 175,2 Ω et $R_{Bi(20°C)}$ = 238,6 Ω (calculées à partir du design) et $R_{Ac} = R_{Bc} \cong 17$ Ω (selon le design et la mesure de la résistance électrique du contact entre les aiguilles de la station sous pointes). En insérant l'équation 5.43 dans l'équation 5.42, nous obtenons une relation entre la puissance P_A (mesurée par l'analyseur de paramètres semi-conducteur) et l'augmentation de température ΔT_A du bilame A

Les figures 5.27 et 5.28 présentent les courbes de déflexion théoriques résultant des simulations réalisées avec le modèle d'actuation trimorphe du microactuateur (SiO_2-Al-PAS avec des épaisseurs respectives t_1 = 2,56 µm, t_2 = 0,8 µm et t_3 = 1,7 µm) superposées aux courbes de déflexion expérimentale. Nous pouvons observer que les déflexions théoriques $d_{thA} = f(P_A)$ et $d_{thB} = f(P_B)$ varient linéairement avec la puissance appliquée ce qui suit, aux incertitudes de mesure près, les courbes de mesures expérimentales $d_A = f(P_A)$ et $d_B = f(P_B)$. En effet, le modèle à n = 3 couches de l'actuation thermique du microactuateur donne des valeurs de déflexion qui sont, au maximum, à 21% des valeurs des mesures expérimentales.

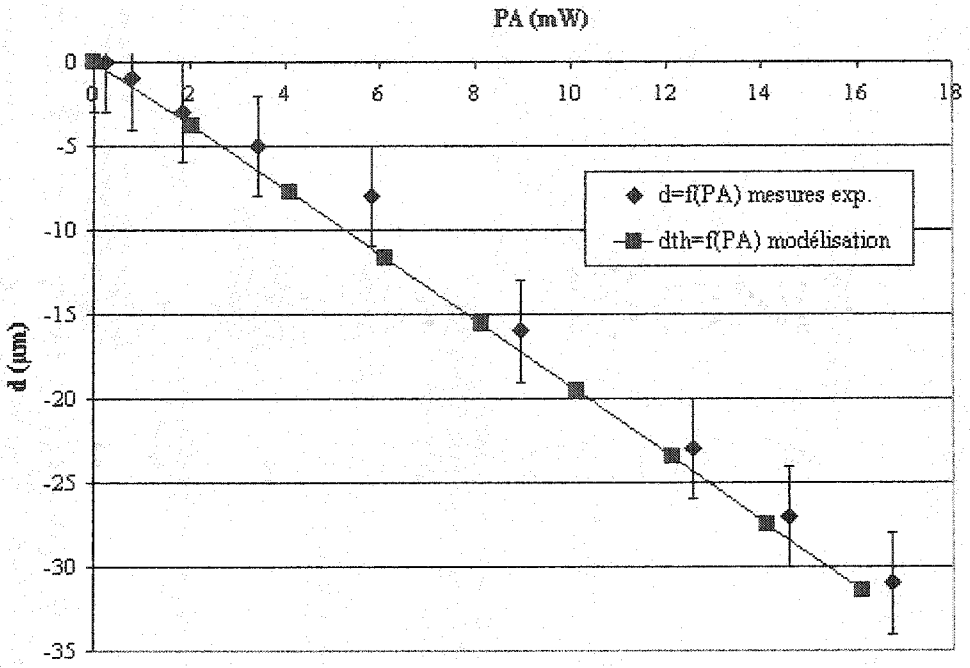


Figure 5.27: Déflexions verticales du microactuateur en fonction de la puissance appliquée P_A selon les mesures expérimentales $d = f(P_A)$ et des simulations basées sur le modèle à n = 3 couches de l'actuation thermique $d_{th} = f(P_A)$ et $G_{thA} = 94{,}6\ \mu W/K$.

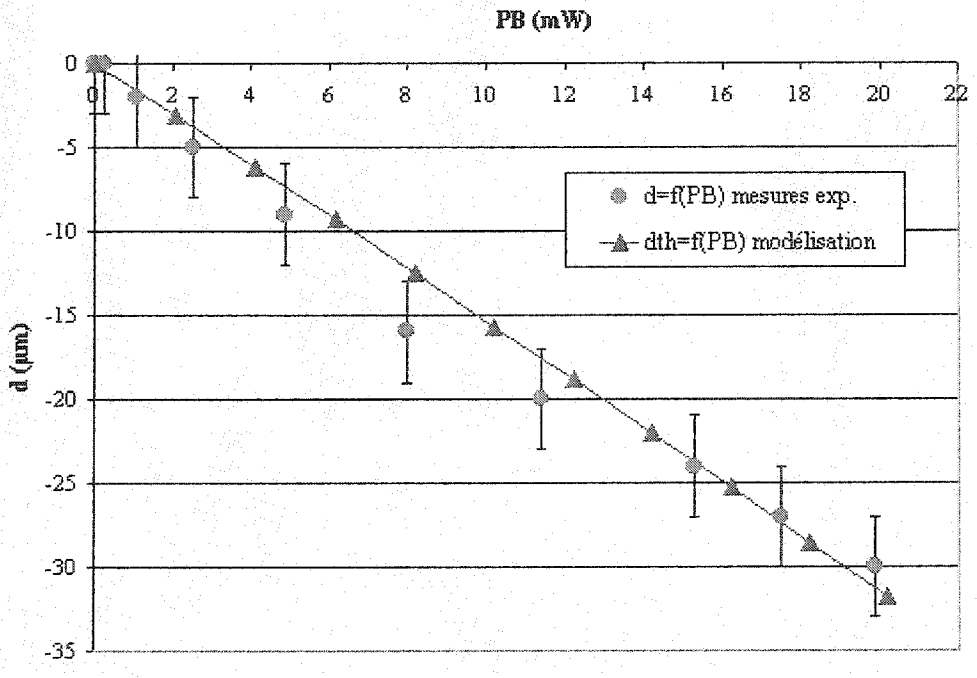


Figure 5.28: Déflexions verticales du microactuateur en fonction de la puissance appliquée P_B selon les mesures expérimentales $d = f(P_B)$ et des simulations basées sur le modèle à n = 3 couches de l'actuation thermique $d_{th} = f(P_B)$ et $G_{thB} = 96{,}9\ \mu W/K$.

Vérifions l'hypothèse que nous avons émise concernant la variation linéaire de la résistance de l'aluminium en fonction de la température pour de faibles variations de celle-ci. Pour ceci, nous avons tracé sur la figure 5.29 les courbes de résistance théoriques $R_{Ath} = f(P_A)$ et $R_{Bth} = f(P_B)$ à partir des équations 5.42 et 5.43 ainsi que les courbes $R_A = f(P_A)$ et $R_B = (P_B)$ obtenues à partir des mesures expérimentales. Nous observons que pour une puissance inférieure à environ 10 mW, qui correspond à des températures comprises entre 20 et 120°C, cette hypothèse semble vérifiée ce. Au-delà de cette puissance, la résistance R_A augmente faiblement tandis que la résistance R_B a tendance à décroître. Cette observation peut être expliquée par le fait que la relation linéaire de l'équation 5.43 est valable sur une faible plage de température et que des termes d'ordre supérieurs s'avèrent nécessaires pour des plages plus larges. D'autre part, la résistance de l'aluminium peut également être influencée par des phénomènes d'électromigration ou les contraintes dans cette couche [96,97].

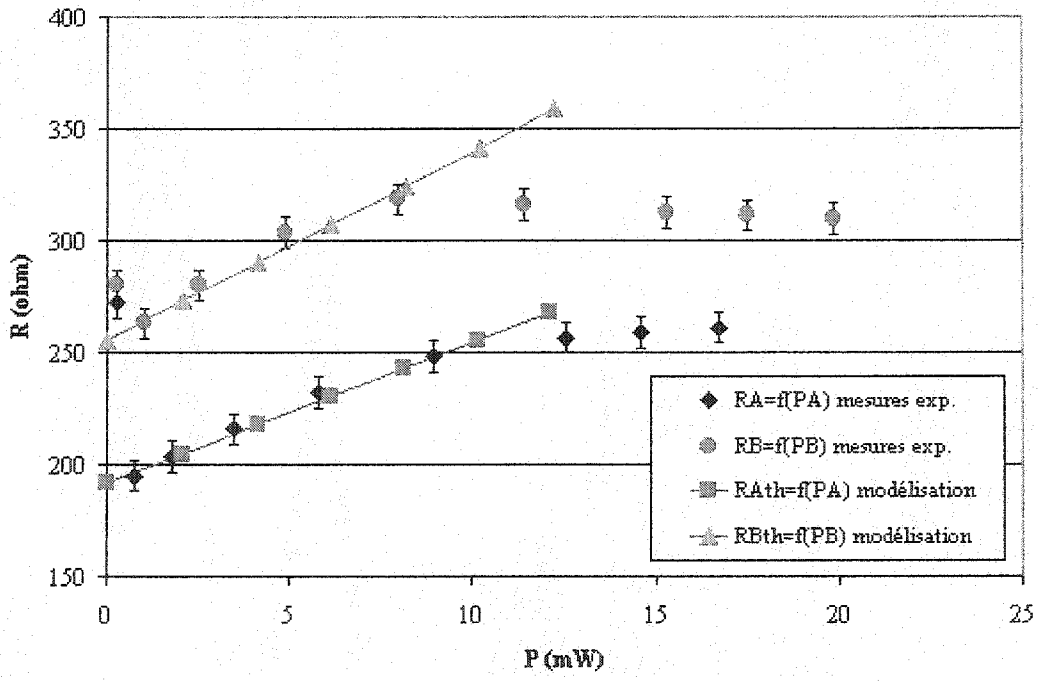


Figure 5.29: Résistances des bilames en fonction des puissances appliquées selon: 1) les mesures expérimentales $R_A = f(P_A)$ et $R_B = f(P_B)$ et 2) les valeurs théoriques $R_{Ath} = f(P_A)$ et $R_{Bth} = f(P_B)$ calculées à partir des équations 5.42 et 5.43.

Les graphiques des figures 5.30 et 5.31 sont des récapitulatifs de la déflexion verticale (en valeur absolue) du microactuateur et des températures atteintes T_A et T_B par les bilames A et B en fonction des puissances électriques appliquées P_A et P_B. Ces graphiques montrent clairement que le bilame A est plus efficace pour faire défléchir verticalement le microactuateur en consommant moins de puissance et nécessitant une température d'actuation plus faible. Les puissances appliquées sur le bilame B sont approximativement supérieures à 26% des valeurs nécessaires au bilame A pour obtenir la même amplitude de déflexion. Au cours des tests d'actuation, la température du bilame A varie de 20°C à 176°C pour effectuer une déflexion maximale de -32 µm avec une puissance maximale appliquée P_A de 16,7 mW. Tandis que la température du bilame B varie de 20 et 204°C pour une déflexion maximale plus faible de -30 µm avec une puissance maximale appliquée de 19,8 mW.

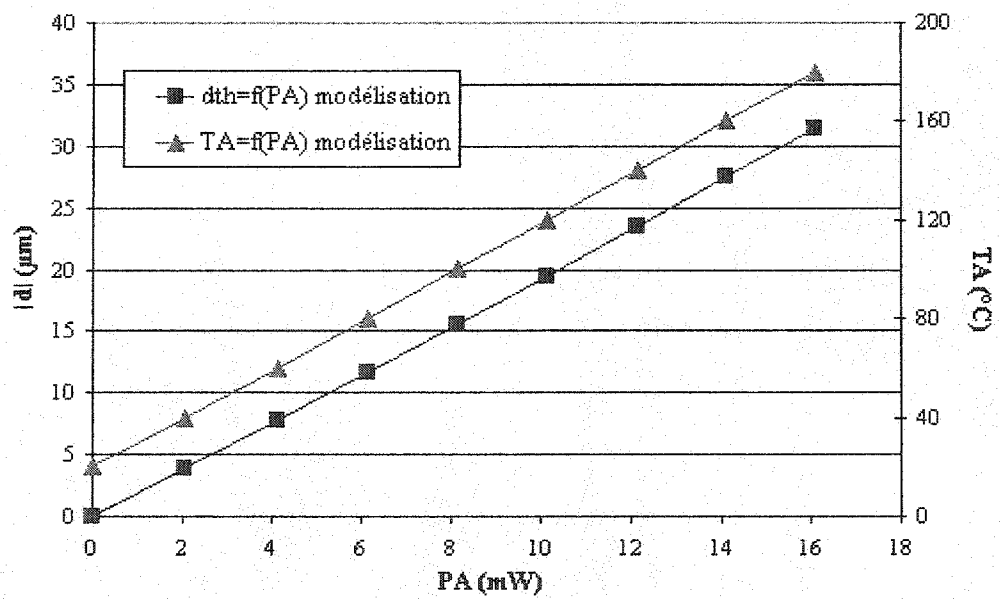


Figure 5.30: Déflexions verticales (en valeur absolue) du microactuateur et températures atteintes par le bilame A en fonction des puissances appliquées, obtenues avec des simulations basées sur le modèle à n = 3 couches de l'actuation thermique et G_{thA} = 94,6 µW/K.

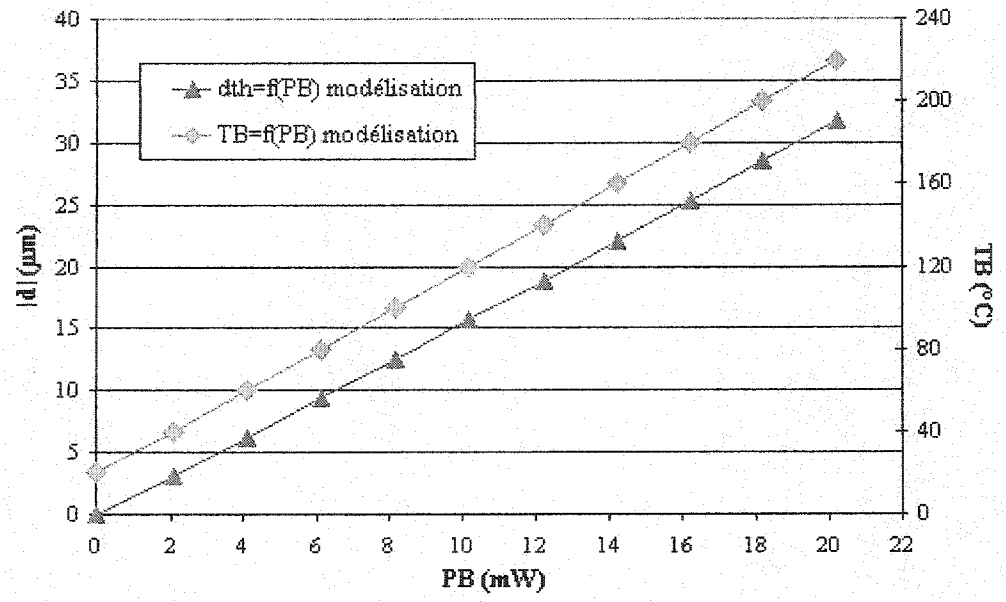


Figure 5.31: Déflexions verticales (en valeur absolue) du microactuateur et températures atteintes par le bilame B en fonction des puissances appliquées, obtenues avec des simulations basées sur le modèle à n = 3 couches de l'actuation thermique et G_{thB} = 96,9 µW/K.

5.3.4 Fréquence de résonance et temps caractéristique d'actuation

5.3.4.1 Calcul et mesures de la fréquence de résonance du microactuateur

Étant donné la complexité du design et la composition non uniforme du microactuateur, nous utilisons un modèle simplifié pour déterminer la fréquence de résonance d'une poutre équivalente en oxyde tel qu'il a été fait dans la section 5.2.5 pour déterminer la force générée. La fréquence de résonance d'une poutre uniforme, caractérisée par un module d'Young E, un moment d'inertie I, une masse m par unité de longueur et une longueur L, est donnée par [98]:

$$f_1 = \frac{\lambda^2}{2\pi}\sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \tag{5.44}$$

où λ = 1,875 représente la valeur propre correspondant au premier mode de vibration pour une structure en porte-à-faux. En introduisant la densité de masse $\rho = 2{,}66 \cdot 10^3$ kg/m^3 pour une couche mince SiO_2 [74] et l'expression 5.30 du moment d'inertie I en fonction de la largeur b et de l'épaisseur t de la poutre dans l'équation 5.44, nous obtenons:

$$f_1 = \frac{\lambda^2}{2\pi \cdot L^2}\sqrt{\frac{E \cdot bt^3}{12 \cdot \rho \cdot bt}}$$

$$\Leftrightarrow \quad f_1 = \frac{\lambda^2}{4\pi \cdot L^2}\sqrt{\frac{E \cdot t^2}{3\rho}} \tag{5.45}$$

$$\text{A.N.:} \quad f_1 = \frac{1{,}875^2}{4\pi \cdot L^2}\sqrt{\frac{69 \cdot 10^9 \cdot (4{,}76 \cdot 10^{-6})^2}{3 \cdot 2{,}66 \cdot 10^3}} = \frac{3{,}91 \cdot 10^{-3}}{L^2}[\text{Hz}] \tag{5.46}$$

La figure 5.32 présente la fréquence de résonance f_1 en fonction de la longueur de la structure en porte-à-faux L (µm). Pour ce calcul, cette longueur L correspond à la longueur effective de la poutre libérée (voir section 5.2.2.1). Il apparaît que, pour une longueur comprise entre 920 et 1000 µm, la fréquence varie entre 3,9 et 4,6 kHz. Une méthode de détection optique aux ultrasons, développée à l'Institut des Matériaux Industriels (CNRC, Boucherville), a été utilisée pour détecter les modes de résonance de deux microactuateurs du design ICBPMAT5 [99]. Les mesures de fréquence de résonance pour ces deux structures sont de 4,272 kHz et 4,456 kHz (voir annexe G) ce qui correspond à des longueurs effectives respectives de 957 et 937 µm selon la figure 5.31. Nous constatons que ces longueurs appartiennent à la gamme de longueurs effectives estimées à la section 5.2.2.1. Ces fréquences de résonance expérimentales sont donc de l'ordre de grandeur des fréquences théoriques. L'équation simplifiée 5.46 semble donc suffisante pour déterminer le premier mode de résonance du microactuateur.

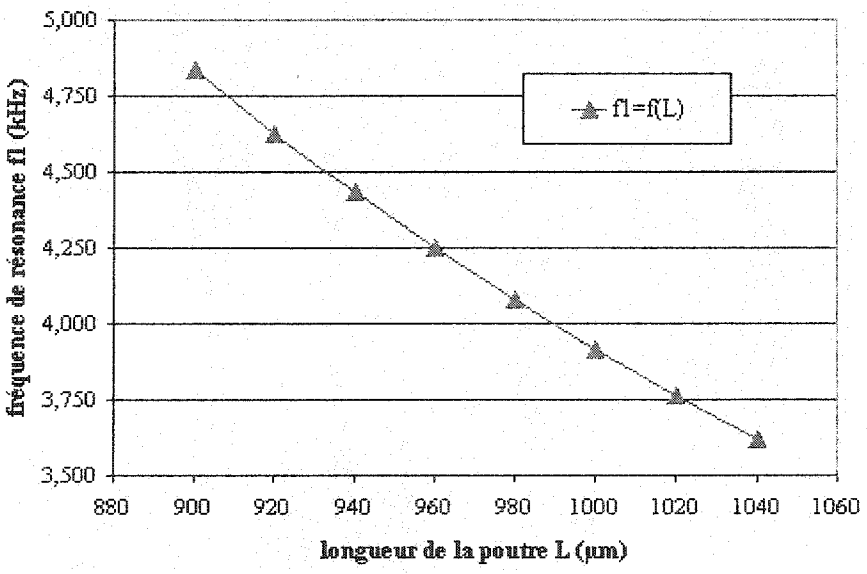


Figure 5.32: Fréquence de résonance selon la longueur du microactuateur.

5.3.4.2 Détermination du temps caractéristique d'actuation des bilames

Nous déterminons le temps caractéristique d'actuation τ du microactuateur à partir de l'équation 2.58 en introduisant les conductances thermiques G_{thA} et G_{thB} des bilames A et B déterminés dans la section 5.3.3.5.

Pour le bilame A (longueur L_A, largeur b_A et épaisseur t_A), le temps caractéristique d'actuation τ_A est calculé à partir de l'équation suivante:

$$\tau_A = \frac{m_A \cdot C_p}{G_{thA}} = \frac{\rho \cdot L_A b_A \cdot t_A \cdot C_p}{G_{thA}} \tag{5.47}$$

où C_p = 1 J/g·K et $\rho = 2{,}66 \cdot 10^6$ g/m^3 correspondent respectivement à la chaleur spécifique et à la densité du SiO_2 le principal matériau du bilame [5,74]. Une application numérique donne:

$$\text{A.N.:} \quad \tau_A = \frac{2{,}66 \cdot 10^6 230 \cdot 200 \cdot 5{,}06 \cdot 10^{-18}}{94 \cdot 10^{-6}} = 6{,}6 \text{ ms}$$

De la même façon, nous déterminons le temps caractéristique d'actuation du bilame B (longueur L_B, largeur b_B et épaisseur t_B) suivant l'équation:

$$\tau_B = \frac{\rho \cdot L_B b_B \cdot t_B \cdot C_p}{G_{thB}} \tag{5.48}$$

$$\text{A.N.:} \quad \tau_B = \frac{2{,}66 \cdot 10^6 \cdot 448 \cdot 130 \cdot 5{,}06 \cdot 10^{-18}}{94 \cdot 10^{-6}} = 8{,}3 \text{ ms}$$

Les temps caractéristiques τ_A et τ_B correspondent à des fréquences d'actuation maximales f_A = 152 Hz et f_B = 122 Hz qui sont très inférieures aux fréquences de résonance estimées précédemment. Par conséquent, des déflexions de grandes amplitudes reliées à la résonance de la poutre ne pourront pas avoir lieu lors de l'activation du microactuateur.

5.3.5 Transition du microactuateur entre les états ON et OFF

Les microactuateurs du design ICBPMAT5 sur lesquels nous avons effectué les tests d'actuation, ne peuvent effectuer leurs transitions entre leurs deux états stables du fait de leur déflexion verticale élevée et la présence de la couche de passivation. Nous utilisons notre modèle d'actuation pour présenter les conditions de fonctionnement tout d'abord pour un microactuateur bimorphe SiO_2-Al comprenant une couche d'oxyde moins épaisse; puis dans le cas d'un microactuateur trimorphe SiO_2-Al-PAS (conservant les épaisseurs actuelles des couches SiO_2 et Al du design ICBPMAT5) utilisant une compensation de la courbure initiale grâce à la couche additionnelle PAS d'épaisseur et de contrainte contrôlée.

5.3.5.1 Conditions de fonctionnement du microactuateur bimorphe

Nous conservons le design initial d'un microactuateur bimorphe SiO_2-Al qui présente l'avantage d'effectuer de grandes déflexions comparativement à une structure trimorphe pour les mêmes températures appliquées. Nous fixons une limite sur la température de chauffage des bilames à 200°C. Pour obtenir une distance de raccourcissement maximale entre l'extrémité de la structure et la butée, le microactuateur doit inverser sa courbure initiale le plus possible avant d'arriver au niveau de la butée.

Le tableau 5.6 présentent la gamme des déflexions initiales d_{init} qui permet au microactuateur d'effectuer sa transition entre ses deux états stables pour une épaisseur de SiO_2 de 1,6 µm et d'Al de 0,8 µm. Ces déflexions initiales ont été obtenues à partir des simulations effectuées avec notre modèle analytique en faisant varier la différence entre les contraintes internes $\Delta\sigma$. Au-dessus de la valeur maximale de la déflexion initiale indiquée dans ce tableau, la température à appliquer pour descendre la structure en dessous du niveau de la butée serait trop importante (supérieure à 200°C). En dessous de la valeur minimale d_{init}, le raccourcissement serait insuffisant pour permettre à la structure de se dégager de la butée (inférieure à 2 µm).

Tableau 5.6: Plage de déflexions initiales pour des transitions du microactuateur bimorphe entre ses états ON et OFF.

d_{init} (µm)	Δx (µm)	ΔT_B (°C)	$\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1$ (MPa)
615,1	14,1	180	230
333,3	3,2	86,2	110
296,2	2,5	74,5	95

Ce tableau montre que pour une déflexion initiale comprise entre 159 et 615 µm, le chauffage du bilame B à une température inférieure à 200°C donne des distances de raccourcissement Δx variant de 2,5 à 14,1 µm qui permettent au microactuateur de passer en dessous du niveau de la butée. Notons que seul le bilame B est activé lorsque l'extrémité du microactuateur est située au-dessus de la butée. En effet, des simulations analytiques ont montré que le chauffage du bilame B uniquement permet d'obtenir des distances de raccourcissement plus grandes qu'avec le bilame A ou les deux bilames activés simultanément. Prenons l'exemple de la structure défléchie initialement à d_{init} = 296,2 µm pour observer les profils de déflexion du microactuateur au cours de sa transition de l'état ON vers l'état OFF. Les propriétés physiques des couches minces utilisées dans cette modélisation sont données dans le tableau suivant. Les contraintes internes sont indiquées dans le tableau 5.7 sont données à titre d'exemple pour les calculs effectués à l'aide du modèle analytique qui suggère une différence de contrainte $\Delta\sigma$ de 95 MPa pour obtenir une déflexion initiale de 296,2 µm.

Tableau 5.7: Propriétés physiques des couches SiO_2 et Al du microactuateur bimorphe défléchi initialement de 296,2 µm [5,74].

couche mince du procédé CMOS	module d'Young E_i(GPa)	contrainte σ_i(MPa)	épaisseur e_i(µm)	coefficient d'expansion thermique α_i(/K)	conductivité thermique k(W/m·K)
Al	74	0	0,8	23	235
SiO_2	69	-95	1,6	0,4	1,4

Transition du microactuateur de l'état ON à l'état OFF:

La transition du microactuateur bimorphe de l'état ON vers son état OFF (voir figure 2.13) s'effectue selon la séquence de chauffage et de refroidissement des bilames A et B suivante:

1) À l'état ON, le microactuateur est dans sa position d'équilibre à la température ambiante (20°C) avec une déflexion initiale de 296 µm.
2) Le bilame B est chauffé jusqu'à une température de 94°C pour permettre tout d'abord à la poutre d'inverser sa courbure puis de se raccourcir suffisamment lors de son passage au niveau de la butée. Le bilame A n'est pas chauffé de manière à ce que le bilame B raccourcisse au maximum le microactuateur avant d'arriver au niveau de la butée.
3) Le bilame A est chauffé jusqu'à 35°C pour que la structure défléchisse sous le niveau de la butée sans toucher le fond de la cavité. Pendant ce temps, la température du bilame B est maintenue à 94°C pour éviter que l'extrémité de la poutre accroche la butée ou passe au-dessus d'elle.
4) Le bilame A est chauffé jusqu'à 56°C pendant que la température du bilame B descend à 56°C. Cette séquence permet au microactuateur de remonter vers la butée tout en restant à un niveau inférieur grâce au chauffage du bilame A. Tandis que le léger refroidissement du bilame B a pour but d'allonger le microactuateur pendant cette déflexion verticale afin de coincer son extrémité sous la butée.
5) Lorsque les bilames A et B sont refroidis jusqu'à la température ambiante, l'extrémité du microactuateur coincée sous la butée maintient l'ensemble de la structure dans son état OFF.

Les profils de déflexion caractérisant le microactuateur entre son état ON et son état OFF sont illustrés sur les figures 5.33. Tandis que la figure 5.34 présente un agrandissement des profils d'actuation correspondants aux étapes 2, 3 et 4 au niveau de la butée.

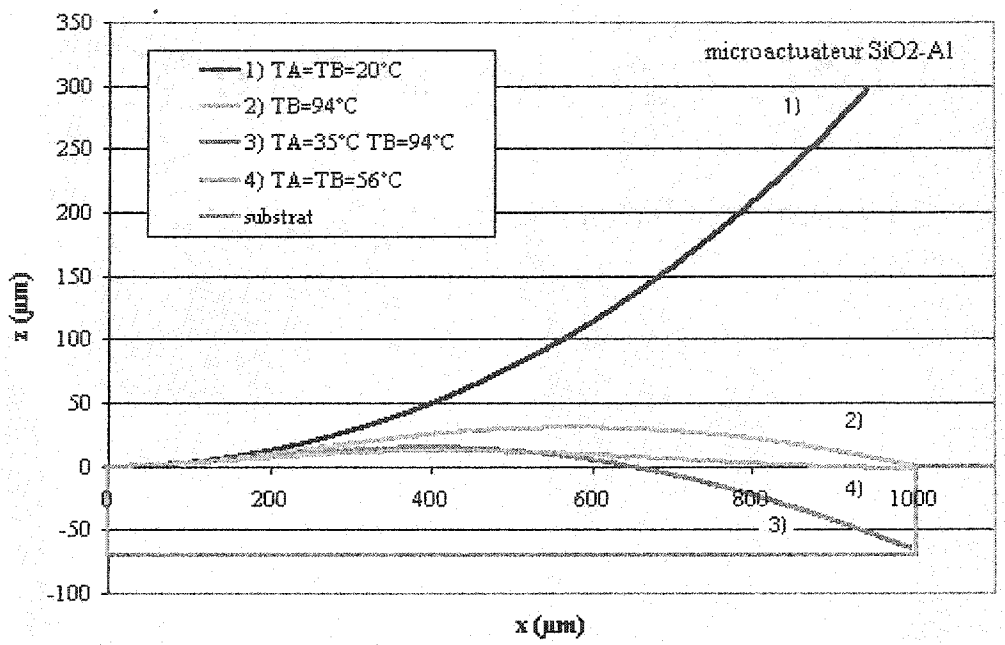


Figure 5.33: Profils de déflexion du microactuateur SiO_2-Al au cours de la transition de l'état ON à l'état OFF, obtenus avec des simulations basées sur le modèle bimorphe de l'actuation thermique (section 5.3.2.2).

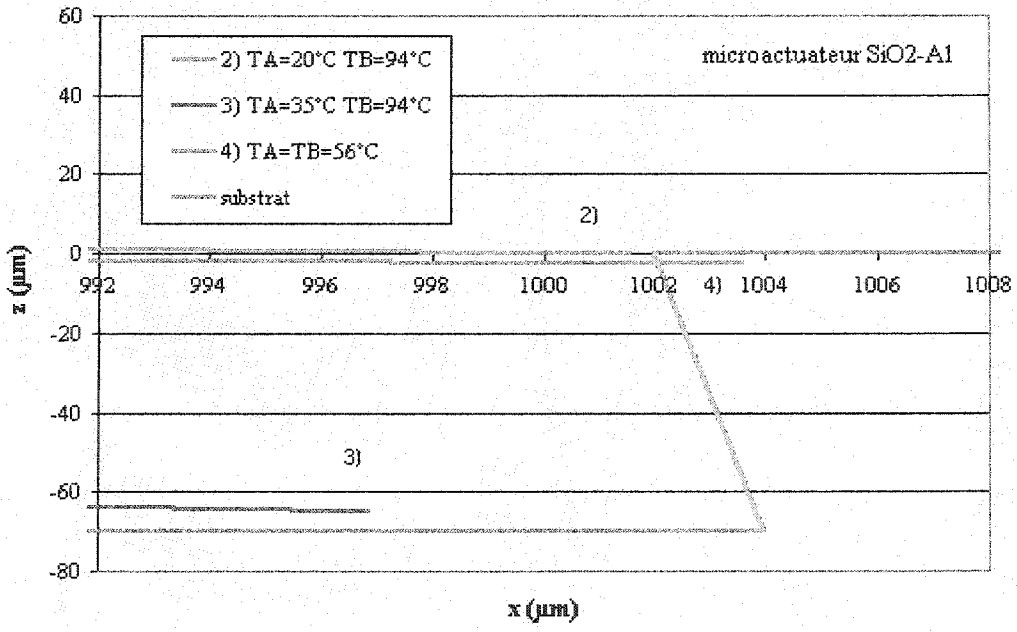


Figure 5.34: Agrandissement au niveau de la butée des profils de déflexion du microactuateur SiO_2-Al selon le modèle bimorphe d'actuation thermique.

Les courbes identifiées "substrat" des figures 5.33 et 5.34 ne correspondent pas au profil réel du substrat. Cependant, elles permettent de repérer le niveau correspondant au fond de la cavité ainsi que le niveau inférieur de la butée. La paroi inclinée du substrat entre 1002 et 1004 µm ne doit pas non plus être prise en considération étant donné qu'elle ne représente pas le profil réel micro-usiné sous la butée. La figure 5.34 permet de visualiser la distance de raccourcissement Δx de 2,5 µm par rapport à la longueur de la poutre de 1004 µm pour cette modélisation. Comme, le chevauchement de la butée sur l'extrémité de la poutre est de 2 µm, il faut s'assurer que le microactuateur ne rencontre pas la butée lors de sa transition. Des distances de raccourcissement sont préférables et peuvent être obtenues en augmentant les températures de chauffage des bilames (voir tableau 5.6).

Transition du microactuateur de l'état OFF à l'état ON:

La transition du microactuateur bimorphe de l'état OFF vers son état ON (voir figure 2.13) s'effectue selon la séquence de chauffage et de refroidissement des bilames A et B décrite précédemment dans le sens inverse:

1) À l'état OFF, le microactuateur est dans une position stable à la température ambiante avec son extrémité coincée sous la butée.
2) Le bilame A est chauffé en premier jusqu'à une température de 56°C pour que la structure défléchisse verticalement. Ensuite, la température du bilame B est augmentée à 56°C pour courber les parties 3 et 4 de la structure. Cette séquence permet au microactuateur de décoller son extrémité de la partie inférieure de la butée.
3) La température du bilame B est augmentée jusqu'à 94°C pendant que le bilame est légèrement refroidi à 35°C. De cette façon, le microactuateur subit un raccourcissement selon l'axe (O,x) tout en défléchissant vers le fond de la cavité. Le bilame A est légèrement refroidi de manière à éviter que la poutre entre en contact avec le substrat.
4) Le bilame A est refroidi de manière à ce que le microactuateur défléchisse vers le haut au-dessus du niveau de la butée. La température du bilame B est maintenue à 94°C pour que le microactuateur reste suffisamment court lors de son passage vers le niveau de la butée.
5) Le refroidissement du bilame B est effectué pour que l'ensemble du microactuateur, dégagée de la butée retrouve sa déflexion naturelle dirigée vers le haut correspondant à son état ON.

5.3.5.2 Démonstration de l'opération d'un microactuateur trimorphe

La section précédente a montré l'opération d'un microactuateur bimorphe en réduisant la différence entre les contraintes internes des couches minces utilisées. Il est impossible pour le concepteur de MEMS de modifier les contraintes internes des couches déposées via un procédé standard CMOS à moins que la fonderie ne modifie ses procédés de fabrication pour déposer des couches faiblement contraintes dans le but de fabriquer des composants MEMS et pas seulement des circuits intégrés. Par conséquent, nous proposons d'ajouter une couche additionnelle afin d'obtenir la déflexion initiale qui permet l'actuation de la microstructure entre ses deux états stables. Nous choisissons de déposer une couche de passivation en post-traitement au lieu d'utiliser celle du procédé CMOS pour pouvoir contrôler son épaisseur et sa contrainte. Nous utilisons les ordres de grandeurs des contraintes du procédé standard CMOS pour les couches de SiO_2 et Al de (σ_1 = -300 MPa et σ_2 = 200 MPa) et les épaisseurs t_1 = 1,6 µm et t_2 = 0,8 µm.

Le tableau 5.9 présente la gamme des épaisseurs t_3 et des contraintes σ_3 de la couche de passivation permettant le changement d'état du microactuateur trimorphe ayant une déflexion initiale de l'ordre de 331 µm. Ce tableau montre que la couche de passivation additionnelle doit être de faible épaisseur comparativement aux couches de SiO_2 et d'Al et fortement contrainte en compression pour réduire de 50% la déflexion initiale de la structure bimorphe. La distance de raccourcissement reste relativement constante étant donné que les déflexions initiales sont quasiment identiques.

Tableau 5.8: Plage des déflexions initiales pour des transitions du microactuateur trimorphe entre ses états ON et OFF avec $\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1$ = 500 MPa

σ_3 (MPa)	t_3(µm)	d_{init} (µm)	Δx (µm)	ΔT_B (°C)
-900	0,31	331,6	3,1	195,7
-1200	0,22	331,5	3,1	156,7
-1500	0,17	331,5	3,1	137,7
-1800	0,14	331,4	3,1	126,4

En prenant l'exemple d'une couche de passivation contrainte à -1,5 GPa pour obtenir une déflexion initiale d_{init} = 331,5 µm, le tableau 5.9 récapitule les propriétés physiques des couches minces utilisées pour simuler les profils de déflexion du microactuateur trimorphe.

Tableau 5.9: Propriétés physiques des couches minces du microactuateur trimorphe défléchi initialement de 331,5 µm [5,74].

couche mince du procédé CMOS	module d'Young E_i(GPa)	contrainte σ_i(MPa)	épaisseur e_i(µm)	coefficient d'expansion thermique α_i(/K)	conductivité thermique k(W/m·K)
PAS	146	-1500	0,17	2,8	18,5
Al	74	200	0,8	23	235
SiO_2	69	-300	1,6	0,4	1,4

La figure 5.35 illustre les profils d'actuation du microactuateur trimorphe entre sa position initiale défléchie vers la haut (état ON) et sa position finale coincée sous le niveau de la butée (état OFF). Tandis que la figure 5.36 présente un agrandissement au niveau de la butée. Les étapes de chauffage et de refroidissement des bilames A et B, pour changer l'état du microactuateur, sont les mêmes que celles décrites précédemment. Le tableau 5.10 résume les séquences de chauffage et de refroidissement des bilames pour effectuer la transition entre les états ON et OFF.

Tableau 5.10:Séquences de chauffage et de refroidissement des bilames A et B pour des transitions du microactuateur trimorphe entre ses états ON et OFF.

Transition de ON à OFF	Transition de OFF à ON
1) $T_A = T_B = 20°C$ (état ON)	1) $T_A = T_B = 20°C$ (état OFF)
2) chauffage $T_B = 158°C$	2) chauffage $T_A = 87°C$ puis $T_B = 87°C$
3) chauffage $T_A = 45°C$ avec $T_B = 158°C$	3) chauffage $T_B = 158°C$ et refroidissement $T_A = 45°C$
4) chauffage $T_A = 87°C$ et refroidissement $T_B = 87°C$	4) refroidissement $T_A = 20°C$ avec $T_B = 158°C$
5) refroidissement $T_A = T_B = 20°C$ (état OFF)	5) refroidissement $T_B = T_A = 20°C$ (état ON)

Les figure 5.35 et 5.36 montrent qu'une couche de passivation de faible épaisseur et ayant une contrainte élevée permet de réduire la déflexion induite par les couches minces inférieures. Il est alors possible d'activer le microactuateur trimorphe de la même façon que sa version bimorphe en utilisant des températures de chauffage un peu plus élevées.

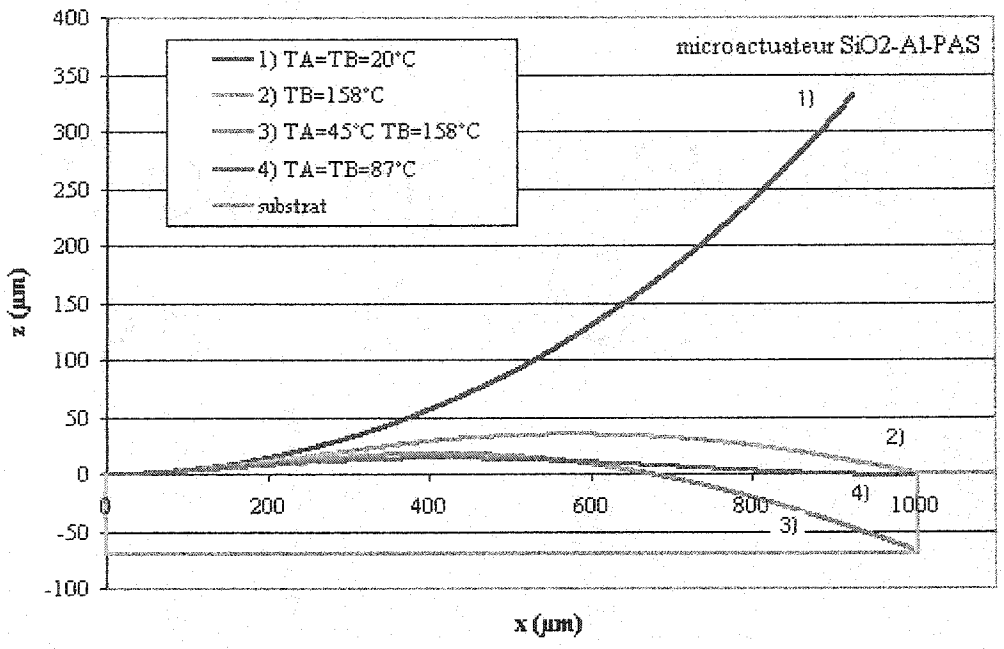


Figure 5.35: Profils de déflexion du microactuateur SiO_2-Al-PAS au cours de la transition de l'état ON à l'état OFF, obtenus avec des simulations basées sur le modèle à n = 3 couches de l'actuation thermique (section 5.3.3.2).

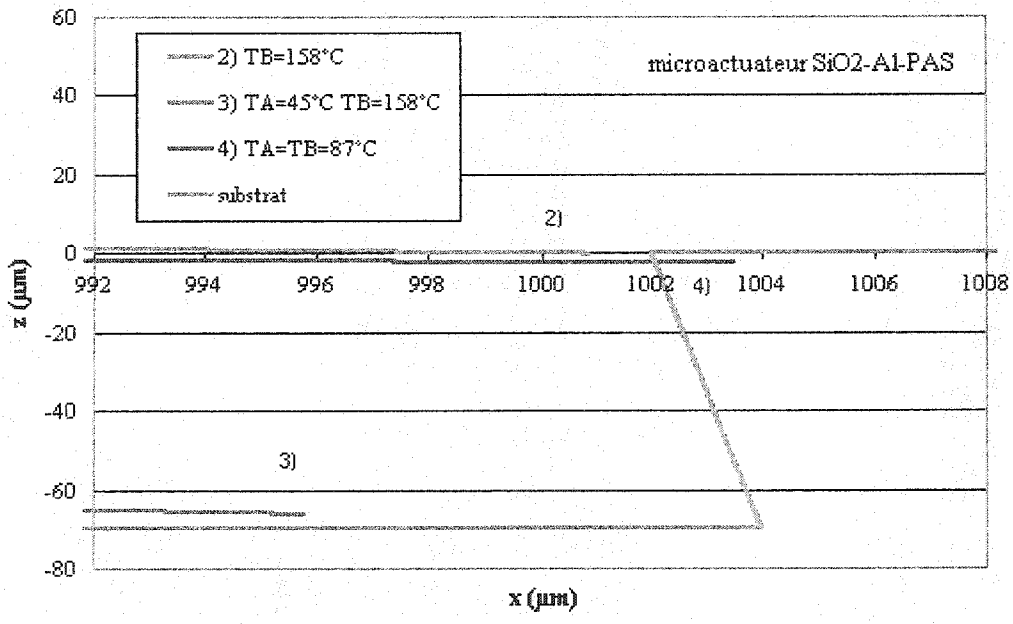


Figure 5.36: Agrandissement au niveau de la butée des profils de déflexion du microactuateur SiO_2-Al-PAS selon le modèle à n = 3 couches de l'actuation thermique.

5.4 Conclusions du chapitre 5

Nous avons caractérisé les microstructures libérées grâce aux techniques de micro-usinage décrites au chapitre 4. Les structures MEMS (encore recouverte par la couche de passivation) présentent une déflexion initiale élevée (de l'ordre de 450 µm) révélant un haut degré de contraintes internes dans les couches minces du procédé CMOS. Nous avons effectué la modélisation de la déflexion initiale pour une structure bicouche puis à n-couches et montré que la présence de la couche de passivation du procédé aide à réduire cette déflexion initiale. Les tests d'actuation sur les microactuateurs nous ont permis d'observer les déflexions induites par le chauffage des bilames A et B. Nous avons développé la modélisation à n-couches de manière à tenir compte de l'actuation thermique et de la déflexion initiale. Notre modélisation analytique à n = 3 couches du microactuateur a été validée au moyen de simulations par éléments finis (logiciel Ansys) et permis de retrouver les résultats expérimentaux. À partir de ce modèle analytique, nous avons démontré la transition entre les états ON et OFF de microactuateurs bimorphe (SiO_2-Al) et trimorphe (SiO_2-Al-PAS).

CHAPITRE 6

CONCLUSION, CONTRIBUTIONS ET SUGGESTIONS POUR DE FUTURS TRAVAUX

6.1 Introduction

L'avancement et les performances de la technologie microélectronique permettent au concepteur de circuits intégrés de se concentrer uniquement sur la partie design et simulation du dispositif avant que celui-ci ne soit fabriqué puis testé. Si le domaine des MEMS utilise en grande partie les technologies de base de la microélectronique, il n'existe pas de procédé standard pour leur fabrication. En effet, la diversité des MEMS se manifeste par leurs multiples domaines d'applications, mais également par les différentes technologies utilisées pour leur fabrication.

Le projet de recherche de cette thèse de doctorat s'est intéressé à l'étude d'implémentation d'un nouveau type de microactuateur dans une technologie standard CMOS. L'avantage majeur d'utiliser une telle technologie est la possibilité d'une production de masse à des coûts réduits de dispositifs intégrant des MEMS et des circuits intégrés sur une seule puce. Ce chapitre résume les contributions des différents travaux de recherche qui ont été présentés dans cette thèse. Des recommandations ainsi que des suggestions de futurs travaux sont également données en fin de chapitre.

6.2 Synthèse et conclusions

Les principaux objectifs de ce projet de recherche, énoncés au chapitre 1, ont été atteints. Nous présentons ici une synthèse des différents travaux que nous avons réalisés et des principaux résultats que nous avons obtenus.

6.2.1 Chap. 1: Introduction

Pour un brevet d'invention du laboratoire LISA concernant le micro-administrateur pharmaceutique (MAP), nous avons conçu une matrice de microactuateurs permettant de libérer sur commande, des nano-doses de médicaments en phase solide, encapsulées dans des cavités micro-usinées dans un substrat de silicium. Pour cette application biomédicale, l'actuateur doit simplement se dégager de la butée pour venir rompre une membrane placée au-dessus. Nous avons élargi le champ d'application du dispositif en l'utilisant comme micro-commutateur pour effectuer des connections entre des lignes de téléphone et de centrales téléphoniques. Le microactuateur conçu utilise une alimentation électrique uniquement pour changer d'état, ce qui le protège des coupures de courant ou de surtensions.

6.2.2 Chap. 2: Conception du microactuateur électrothermique bistable

Nous avons choisi, pour notre microactuateur, un mode d'actuation électro-thermo-mécanique basé sur le principe simple de l'effet bimorphe qui nécessite uniquement deux couches minces accolées et caractérisées par des coefficients d'expansion thermique différents. L'innovation du microactuateur est sa bistabilité qui n'utilise pas d'énergie électrique pour maintenir ses états stables. Pour ceci, le microactuateur utilise les actuations thermiques indépendantes et contrôlées de deux bilames A et B constitués par des résistances de chauffage en aluminium sur une structure en porte-à-faux en oxyde de silicium. Nous avons optimisé le design du dispositif en réduisant au minimum ses dimensions et sa consommation en énergie électrique tout en permettant les déflexions nécessaires à son actuation; ceci en utilisant notamment la modélisation de l'effet bimorphe de Chu *et al.*[72] et des simulations par éléments finis à l'aide du logiciel Ansys. Nous avons analysé les transferts de chaleur dans le cas d'une structure en porte-à-faux avec une résistance de chauffage intégrée. Pour la plage de température utilisée, nous avons montré la prédominance de la conduction thermique dans la structure et dans

l'air ambiant par rapport aux échanges de chaleur dus à la convection et à la radiation. Nous avons déterminé que la conduction de la chaleur a essentiellement lieu dans les lignes conductrices en aluminium situées dans le bras de la structure reliant la résistance de chauffage au substrat et dans l'air ambiant situé entre la base de la structure bilame et le fond de la cavité. Nous avons ensuite développé un modèle thermique simple afin de déterminer la distribution en température sur les différentes parties du microactuateur lors du chauffage localisé des bilames pour un dispositif opérant dans l'air ambiant ou dans le vide. Ce modèle nous a permis de calculer des conductances thermiques théoriques G_{thA} = 62,8 µW/K et G_{thB} = 88,6 µW/K dans l'air ambiant et de déduire l'ordre de grandeur des puissances électriques à appliquer pour atteindre les températures de chauffage désirées pour les bilames A et B. La distribution en température et les conductances thermiques des bilames ont également été calculées pour une activation du microactuateur dans le vide.

6.2.3 Chap. 3: Microfabrication du dispositif en technologie CMOS

Grâce à des subventions de la CMC, nous avons eu accès à la technologie Mitel 1,5 µm CMOS pour la fabrication de nos dispositifs MEMS et aux services Can-MEMS. Nous avons conçu notre microactuateur en fonction des couches minces du procédé tout en respectant leur séquence de dépôt. Fabriqué de façon monolithique grâce au procédé CMOS, il offre une capacité d'intégration à grande échelle à cause de ses petites dimensions et, la possibilité d'être contrôlé directement par un système d'adressage microélectronique intégré sur le même substrat. Nous avons conçu le design de plusieurs générations de microactuateurs et dessiné à l'aide du logiciel Cadence les plans de masques (voir annexe A) utilisés pour leur fabrication en respectant au maximum les règles de design pour cette technologie dédiée à la fabrication de circuits intégrés. Des simulations du procédé de fabrication à l'aide du logiciel MemsproTools ont permis d'obtenir la vue 3D du microactuateur à partir des plans de masque. Pour le dernier design ICBPMAT5, le microactuateur est composé d'une triple couche d'oxyde (ACT-CON-VIA), de la seconde couche métallique (M2) en aluminium du procédé et de la couche de passivation (PAS) pour sa protection lors des étapes de micro-usinage. Tandis que la butée du microactuateur est composée de l'ensemble des couches du procédé ainsi que des couches de platine et de nitrure de silicium du service Can-MEMS. Entre le moment où les plans de masques ont été soumis et les échantillons reçus, les délais peuvent varier de 4 à 11 mois ce qui

empêche une rétroaction rapide et ralentit le développement du design de notre dispositif. Parallèlement à la conception des designs nous avons effectué sur le développement de techniques de micro-usinage compatibles CMOS. Nous avons réalisé de nombreux tests pour aboutir aux procédures expérimentales résumées dans l'annexe B. La stratégie de micro-usinage que nous avons établie utilise notamment les avantages liés à une gravure hybride pour libérer le microactuateur du substrat de silicium, mais aussi l'orientation de la structure à un angle $\alpha = 22°$ par rapport à la direction <110>, ses dimensions réduites et l'utilisation de coins convexes dans son design afin de réduire les temps de gravure.

6.2.4 Chap. 4: Micro-usinage de l'actuateur: mesures, résultats et discussion

Nous avons caractérisé les épaisseurs des couches minces du procédé au moyen de mesures profilométriques. Une coupe transversale du microactuateur par FIB observée au MEB confocal a permis d'estimer les épaisseurs des couches minces de la structure. Nous avons tout d'abord mis en évidence que les couches déposées au début de la séquence de dépôt pouvaient être surgravées au cours des étapes de mise en forme des couches suivantes. Nous avons constaté que l'épaisseur finale d'une combinaison de couches minces telle que la triple couche d'oxyde dépend des dimensions du motif. Par exemple, une épaisseur totale de 1,72 µm a été mesurée pour le carré de couches minces ACT-CON-VIA (200 µm par 200 µm) tandis qu'une épaisseur de 2,56 µm est déterminée via la coupe FIB et le FESEM. En particulier, l'épaisseur de la couche de passivation mesurée entre 1,4 et 1,7 µm suivant les séries de fabrication était supérieure à sa valeur nominale de 1 µm.

Après l'annulation du service Can-MEMS, nous avons dû effectuer le dépôt et la mise en forme de la couche de Pt au laboratoire LISA. L'étape de photolithographie était une étape critique du fait que nous devions effectuer un alignement manuel sur des quarts de gaufre comportant tous les niveaux de couches minces du procédé. Nous avons optimisé l'étape du lift-off en développant une technique bicouche permettant un retrait plus efficace des morceaux de platine non désirés. L'alignement et la résolution des motifs de platine obtenus étaient satisfaisants pour nos microactuateurs. Initialement, nous avons utilisé les couches de nitrure de silicium du service Can-MEMS afin de compenser les faiblesses de la couche de passivation du procédé lors de la gravure au TMAH. Lorsque le post-traitement Can-MEMS n'a plus été disponible, nous avons tenté de réaliser des couches de nitrure de silicium au moyen d'un ECR-

PECVD (laboratoire LISA) pour remplacer celles du service Can-MEMS. Cependant, nous ne sommes pas parvenus à des couches de densité satisfaisante pour protéger suffisamment le microactuateur lors de la gravure TMAH. Par conséquent, nous avons choisi d'optimiser le design et la stratégie de micro-usinage pour réduire les temps de gravure et libérer complètement les structures MEMS sans que ces dernières ou la partie microélectronique du dispositif ne soit endommagées.

Pour l'étape de gravure anisotrope au TMAH, nous devions libérer du substrat de grandes structures MEMS (~1 mm de long) recouverte d'une couche de passivation présentant des faiblesses vis-à-vis de la gravure au TMAH et dont le comportement était très irrégulier d'une série de fabrication à une autre. Pour certains designs, les pads de contact recouverts de cette couche de passivation ont bénéficié d'une protection supplémentaire, soit via un masque en téflon (porte-chantillon) que nous avons usiné, soit au moyen d'une couche de résine négative résistant suffisamment longtemps au TMAH. Dans le but de bénéficier des plans cristallins du silicium ayant un taux de gravure élevé (~ 52 µm/hr) dans le TMAH, le microactuateur a été orienté à un angle de déviation $\alpha \cong 20°$ par rapport à direction <110>. Le design a aussi été modifié pour que la structure ait des dimensions minimales ainsi que plusieurs coins convexes. La première étape de gravure (TMAH) permet de graver une grande partie du silicium situé sous la structure ainsi que les couches métalliques sacrificielles séparant le microactuateur de la butée. Des simulations à l'aide du logiciel AnisE nous ont permis d'étudier l'effet de l'orientation du microactuateur sur le taux de gravure de la structure et la géométrie des plans sous-gravés.

Les expériences de gravure isotrope au XeF_2 ont permis de compléter la libération des microstructures avec un taux de gravure élevé (~ 1,2 µm/min) et une grande sélectivité vis à vis des matériaux du procédé CMOS. Par conséquent, le retrait de la couche de passivation pourrait précéder cette gravure au XeF_2 puisque celle-ci n'attaque pas la couche d'aluminium qui constitue les résistances de chauffage des bilames. À partir de la publication de Chu *et al.* [100], nous avons conçu et réalisé le montage de gravure au XeF_2. Nous avons utilisé une méthode de gravure pulsée qui consiste à alterner des séquences de flux continu et de stagnation du XeF_2 gazeux au-dessus des échantillons. Pour cette gravure isotrope, les ouvertures vers le silicium de chaque côté du microactuateur ont été agrandies pour permettre au gaz de mieux circuler. L'utilisation d'une gravure au XeF_2 permet de compléter la libération des structures à la température ambiante en évitant les problèmes de succion reliés à une gravure en phase liquide.

L'étude de la gravure au RIE de la couche de passivation a été effectuée parallèlement à la conception du dernier design ICBPMAT5. Nous avons mis au point un procédé de gravure utilisant initialement du CF_4 pour graver les couches SiO_2 et Si_xN_y de la couche PAS. En ajoutant de l'oxygène, nous avons augmenté l'efficacité de cette gravure et nous avons obtenu des taux de 750 Å/min pour la couche SiO_2 et de 2150 Å/min pour la couche Si_xN_y.

6.2.5 Chap. 5: Caractérisation et modélisation du microactuateur

Après les étapes de micro-usinage, les microstructures ont été observées au MEB dans leurs états ON et OFF. Les microactuateurs présentent des déflexions initiales très importantes (de ~ 460 µm) compte tenu de leurs dimensions. Nous avons obtenu des profils de déflexion à partir des mesures au microscope optique ainsi qu'en utilisant une technique de profilométrie optique 3D du CNES. L'empilement de toutes les couches d'oxydes du procédé aurait dû présenter des contraintes internes très basses et être une bonne combinaison pour réaliser des composants MEMS [80]. La forte déflexion initiale observée était difficile à prévoir sans connaître les propriétés mécaniques (les contraintes internes), les épaisseurs réelles et la nature exacte des couches minces déposées. De plus, pour la dernière génération de microactuateurs du design ICBPMAT5, des problèmes dans le procédé de fabrication n'ont pas permis d'ouvrir entièrement les ouvertures dans la couche de passivation. La conséquence pour le microactuateur a été dramatique puisque la présence de la couche PAS maintenait la structure et la butée solidaires. Plusieurs tentatives pour ouvrir cette couche de passivation (gravure RIE avec un masque de résine et ouverture via un procédé laser). En fin de compte, l'utilisation d'une gravure unique au TMAH a permis de rompre cette couche de passivation. De cette façon, nous avons pu effectuer des tests d'actuation sur des microactuateurs trimorphes du fait que la couche de passivation a été conservée pour protéger les résistances de chauffage de la gravure TMAH. Les tests d'actuation nous ont permis de caractériser la déflexion du microactuateur en fonction du chauffage des bilames A et B.

Nous avons étudié le comportement électro-thermo-mécanique du microactuateur afin de développer un modèle analytique qui tiendrait compte de la déflexion initiale en fonction des contraintes internes et de l'actuation thermique d'une structure trimorphe composée essentiellement de 4 parties (voir figure 2.16).

Tout d'abord, nous avons modifié le modèle thermomécanique de la section 2.4.1 afin d'obtenir le rayon de courbure caractérisant la déflexion initiale d'une structure bimorphe en fonction des contraintes internes σ_1 et σ_2 dans ses couches minces. Au cours de la dernière année de ce projet, nous avons pu obtenir des informations sur le procédé Mitel 1,5 µm CMOS, notamment sur l'ordre de grandeur des contraintes internes dans les couches minces.

Dans le cas du microactuateur bimorphe SiO_2-Al, nous avons calculé une déflexion initiale de ~ 664 µm pour des contraintes σ_1 = -300 MPa et σ_2 = 200 MPa. Nous avons effectué des simulations montrant la déflexion initiale du microactuateur en fonction des contraintes internes dans les couches de SiO_2 et d'Al. Plus la contrainte σ_1 est compressive ou plus la contrainte σ_2 est en tension, plus la déflexion initiale de la structure augmente.

Nous avons ensuite généralisé le modèle de la déflexion initiale pour une structure à n-couches en fonction des contraintes internes σ_i. En utilisant le modèle à n = 3 couches pour le microactuateur SiO_2-Al-PAS et en ajoutant la contrainte σ_3 = -50 MPa, nous obtenu une déflexion initiale de ~ 460 µm et un profil de déflexion correspondant à celui obtenu expérimentalement. Notre modèle est validé d'une part par comparaison avec la déflexion initiale expérimentale et d'autre part avec une simulation par éléments finis à l'aide du logiciel Ansys. Nous avons étudié les variations de la déflexion initiale du microactuateur en fonction des contraintes internes dans les couches de SiO_2, Al et PAS. Les simulations effectuées avec le modèle analytique ont montré que la contrainte exerçant le plus d'influence sur la déflexion initiale de la structure est celle de la couche SiO_2 pouvant faire varier une déflexion maximale z_{max} de +576 µm à -200 µm pour une contrainte σ_1 variant de -400 MPa à +100 MPa. Ces résultats, obtenus avec le modèle à n = 3 couches, ont été validés par des simulations par éléments finis. Nous avons montré que la variation de la contrainte dans la couche d'Al a peu d'influence sur la déflexion initiale de la structure avec une déflexion verticale d ~ -20 µm lorsque σ_2 varie entre 300 MPa et -200 MPa. Par contre, nous avons mis en valeur que la contrainte dans la couche de passivation pouvait jouer un rôle significatif dans la réduction de la déflexion initiale de la structure en induisant une déflexion verticale d de -310 µm en faisant varier σ_3 de 150 MPa à -350 MPa.

Par la suite, nous avons développé le modèle d'actuation thermique d'une structure multimorphe à n-couches tenant compte de: 1) la déflexion initiale résultant de la relaxation des contraintes internes et 2) la déflexion résultant de l'augmentation de température. Ce qui nous a permis de donner l'expression du rayon de courbure r en fonction des contraintes internes σ_i et des coefficients d'expansion α_i de l'augmentation de température ΔT et des caractéristiques des matériaux.

Afin d'obtenir les profils de déflexion du microactuateur en régime permanent lors du chauffage des bilames A et B, nous avons effectué une discrétisation du microactuateur en divisant sa longueur en N portions de longueur dx. Pour chaque portion, nous avons utilisé la température atteinte d'après notre modélisation thermique (présenté au chapitre 2 et appliqué au microactuateur à 3 couches) afin de calculer le rayon de courbure correspondant. Les profils de déflexion ont été obtenus en programmant le modèle d'actuation du microactuateur au moyen du logiciel Labview. Nous avons montré qu'un microactuateur bimorphe avec une augmentation de température de ~ 200°C dans le bilame A ou B, peut effectuer une déflexion d de -450 µm, soit atteindre la hauteur de la butée. En appliquant le modèle à n = 3 couches, pour une même augmentation de température, le microactuateur effectue une déflexion d ~ -55 µm. Nous avons démontré que la présence de la couche de passivation réduit approximativement d'un facteur 10, l'amplitude de déflexion du microactuateur bimorphe initialement conçu. Notre modèle d'actuation à n = 3 couches a été validé en retrouvant les mesures expérimentales de déflexion du microactuateur en fonction des puissances appliquées dans les bilames A et B. Pour ceci, nous avons calculé les conductances thermiques théoriques G_{thA} = 94,6 µW/K et G_{thB} = 96,9 µW/K dans le cas du microactuateur SiO_2-Al-PAS qui permettent de relier la puissance appliquée à l'augmentation de température. De cette façon nous avons pu estimer les températures atteintes au cours des tests d'actuation. Nous n'avons pas pu tester expérimentalement la transition du microactuateur bimorphe pour le dernier design ICBPMAT5. Cependant, nous avons déterminé les conditions de fonctionnement du microactuateur selon sa composition bimorphe ou trimorphe.

6.3 Contributions scientifiques

Pour cette étude d'implémentation d'un microactuateur électrothermique bistable dans une technologie standard CMOS, nos principales contributions scientifiques sont:

- La conception d'un nouveau type de microactuateur présentant l'avantage d'être bistable. En effet, les dispositifs utilisés comme micro-commutateurs ont souvent une seule position stable et/ou nécessitent l'application d'un courant ou d'une tension en permanence pour garder leur position. Peu d'études de microactuateurs bistables ont été publiées [40]. Notre microactuateur nécessite seulement l'application d'une puissance électrique pour effectuer la transition entre ses deux états stables [83], ce qui lui permet de garder sa configuration en cas de surtension ou de coupure de courant.

- L'innovation du microactuateur avec un design original comportant deux bilames utilisés pour faire défléchir verticalement (bilame A) ou raccourcir l'ensemble de la structure (bilame B). Des séquences de chauffage et de refroidissement précises de ces bilames permettent la transition entre les deux états stables. Le design le plus proche de notre structure a été publié en 1998 par Sun *et al.* [42]. Leur microactuateur, fabriqué au moyen d'une technologie de micro-usinage en surface, effectue des déplacements dans le plan du substrat. Leurs bilames sont situés de part et d'autre de la structure tandis que, dans notre design, les bilames sont situés du même côté, induisant dans notre cas, une déflexion activée toujours dans la même direction. Notre microactuateur, fabriqué via une technologie de micro-usinage en volume, offre la possibilité d'effectuer des déplacements verticaux de grandes amplitudes.

- La conception et l'optimisation du design du microactuateur en minimisant ses dimensions et sa consommation électrique tout en permettant les déflexions nécessaires à son actuation. Nous avons conçu les résistances de chauffage des bilames à partir de considérations électrothermiques et thermomécaniques utilisant notamment le modèle de déflexion d'une structure bilame publié par Chu *et al.* [72].

- La modélisation thermique du microactuateur via une analyse des transferts de chaleur en vue d'un fonctionnement dans le vide et dans l'air ambiant. Cette modélisation nous a permis de déterminer la distribution de la température le long de la structure lors du chauffage individuel ou simultané des deux bilames. Nous avons également calculé les conductances thermiques théoriques caractérisant l'isolement thermique des bilames. Cette modélisation thermique, intégrée au modèle d'actuation développé au chapitre 5, a permis de retrouver les résultats expérimentaux.

- La conception de la fabrication du microactuateur et de la butée en fonction des couches minces d'un procédé standard CMOS en respectant la séquence de dépôt et les règles de design de la technologie employée [83]. La plupart des composants CMOS MEMS sont fabriqués après que le procédé CMOS aie été réalisé pour la fabrication des circuits intégrés. Notre microactuateur est fabriqué de façon monolithique avec le procédé CMOS. Il offre une capacité d'intégration à grande échelle à cause de ses petites dimensions et la possibilité d'être adressé par un circuit microélectronique intégré sur le même substrat.

- La conception et l'optimisation d'une stratégie de micro-usinage compatible CMOS utilisant notamment une gravure hybride. Le micro-usinage de structures MEMS utilise généralement une seule étape de gravure anisotrope ou isotrope permettant leur libération du substrat. L'utilisation d'une gravure hybride en post-traitement CMOS est peu courante. Tea *et al.* [81] ont publié en 1997 une méthode de gravure hybride comprenant une gravure isotrope pour sous-graver le silicium situé sous leur structure, suivi d'une gravure anisotrope afin de réaliser des canaux micro-fluidiques en forme de V. Dans notre cas, nous avons conçu une méthode de micro-usinage hybride utilisant les avantages d'une première gravure anisotrope. Nous avons optimisé le design du microactuateur doté de plusieurs coins convexes et orienté avec angle $\alpha \cong 20°$ par rapport à la direction <110> afin de profiter des plans rapidement gravés [82]. La seconde gravure au XeF_2 permet de compléter la libération des structures dans un milieu gazeux ce qui évite les problèmes de succion typiques des agents de gravure liquides. L'optimisation des techniques de micro-usinage appliquées en post-traitement CMOS permet de libérer 100% des structures MEMS de nos échantillons.

- Le développement d'un modèle analytique tenant compte de la déflexion initiale en fonction des contraintes internes et de l'actuation thermique d'une structure multimorphe à n-couches. Notre modèle d'actuation à n = 3 couches, appliqué au microactuateur, utilisant des paramètres physiques publiés ou mesurés et les distributions de température et les conductances thermiques obtenues à partir de notre modèle thermique, a permis de retrouver les mesures expérimentales. Compte tenu des incertitudes sur les paramètres physiques utilisés et sur les mesures expérimentales, notre modèle analytique est très satisfaisant puisqu'il permet de retrouver d'une part la déflexion initiale résultant de la relaxation des contraintes internes et d'autre part les déflexions verticales par le chauffage des bilames sans utiliser de paramètre ajustable. De plus, les résultats obtenus avec notre modèle ont été confirmés avec des simulations par éléments finis à l'aide du logiciel Ansys.

- La proposition de deux configurations de microactuateur (bimorphe ou trimorphe) ainsi qu'une description de leurs conditions de fonctionnement. Étant donné que le modèle analytique à n = 3 couches et les simulations par éléments finis sont en accord avec les résultats expérimentaux, nous pensons que notre modèle d'actuation donne des résultats significatifs. Nous présentons donc des solutions extrapolées de notre modèle analytique pour un microactuateur formé de 2 ou 3 couches (avec un contrôle des contraintes internes ou l'addition d'une couche supplémentaire dans le but de contrôler la déflexion initiale). Notre modèle d'actuation à n-couches présente l'avantage d'être applicable à n'importe quel procédé CMOS.

6.4 Suggestions pour de futurs travaux

Dans la section 5.3.5, nous avons suggéré des configurations de notre microactuateur, bimorphe ou trimorphe, permettant sa transition entre les états ON et OFF. Pour la poursuite des travaux de recherche de cette thèse, nous suggérons de tester l'actuation de ces microactuateurs afin de vérifier la validité des solutions extrapolées du modèle analytique que nous avons développé au chapitre 5. Nous avons présenté un modèle d'actuation à n-couches qui présente l'avantage d'être utilisable pour n'importe quel procédé CMOS. Par conséquent, le concepteur de MEMS pourra utiliser ce modèle et l'appliquer à sa structure multimorphe pour effectuer des

simulations de son comportement thermomécanique. De futurs travaux pourraient s'orienter vers l'amélioration du design du microactuateur dans le but de le rendre plus approprié à une fabrication industrielle à grande échelle et haut rendement.

Pour ce projet de doctorat, les principales contraintes venaient du procédé CMOS utilisé: l'incertitude sur les épaisseurs réelles des couches minces, l'indétermination concernant leurs propriétés mécaniques et thermiques et l'évolution du procédé qui nous a conduit à adapter les techniques de micro-usinage en conséquence. Bien que nous ayons respecté au maximum les règles de designs CI de la technologie, nous ne pouvions avoir de garantie sur la fabrication finale des microstructures. Par conséquent, nous pensons qu'il est nécessaire d'élaborer des règles de design spécifiques aux MEMS pour leur réalisation via un procédé CMOS. Les travaux de recherche auraient pour objectif d'établir le lien entre les dimensions des motifs, les épaisseurs obtenues en fonction des combinaisons de couches et la précision des alignements suivant la topographie. De plus, parmi la liste de règles de design CI fournie par la fonderie, il serait utile de séparer celles qui assurent le bon fonctionnement des circuits intégrés de celles reliées aux performances des techniques de dépôt et de mise en forme des couches minces du procédé.

La caractérisation des couches minces (propriétés mécaniques, thermiques etc.) est également nécessaire pour faciliter la modélisation de composants MEMS. Cependant, il est difficile d'effectuer cette caractérisation lorsque tout le procédé a déjà été appliqué à un échantillon. Une collaboration avec la fonderie est donc indispensable pour identifier les propriétés physiques des couches minces. Les outils CAD de modélisation se développent de plus en plus pour les dispositifs MEMS et aident à l'avancement de ce domaine. Cependant, une banque de données regroupant les paramètres électriques, mécaniques, thermiques des matériaux couramment utilisés, est nécessaire pour que les simulations se rapprochent de la réalité.

Selon l'auteur de cette thèse, il est nécessaire de modifier les spécifications des technologies CMOS destinées à s'orienter vers la fabrication de IC MEMS. Ceci, dans le but d'assurer une meilleure reproductibilité dans les épaisseurs et les propriétés des couches minces, ainsi qu'un meilleur contrôle sur leurs contraintes internes. Un procédé "CMOS MEMS" serait donc une technologie optimisée à la fois pour la fabrication de circuits intégrés et de composants MEMS. Pour cette technologie, certaines propriétés physiques des couches devraient être contrôlées en plus des paramètres habituellement pris en compte dans la fabrication IC.

Plusieurs travaux de recherche pourraient être effectués pour caractériser les microactuateurs développés dans cette thèse. Un microscope relié à une caméra thermique IR serait très utile pour observer la distribution de température le long de la structure lors du chauffage des bilames. Ceci permettrait de vérifier le modèle thermique établi au chapitre 2 et de l'améliorer. Une technique de caractérisation dynamique des microstructures serait également très utile pour observer les profils de déflexion du microactuateur en régime transitoire. Une telle étude permettrait d'améliorer notre compréhension du comportement électro-thermo-mécanique de la structure et de raffiner le modèle d'actuation développé au chapitre 5. Pour cette caractérisation, nous suggérons l'utilisation d'un système du type "computer microvision". Cet outil permet de visualiser les mouvements de structures MEMS en utilisant une caméra CCD pour recueillir les images obtenues au microscope optique ainsi qu'une illumination stroboscopique pour capter plusieurs séquences d'images au cours du temps avec de multiples mises au point [101].

Pour les applications potentielles du microactuateur, présentées au chapitre 1, les travaux de recherche doivent s'orienter vers l'assemblage de la matrice d'actuateurs avec les autres composantes du dispositif final. Ainsi pour le dispositif MAP, il est nécessaire de développer la partie encapsulation pour pouvoir tester le fonctionnement du microactuateur vis à vis de la membrane qu'il doit rompre afin de libérer la dose de médicament. L'application micro-relais du microactuateur nécessite également l'assemblage avec la matrice de lignes conductrices (sur PCB) pour caractériser le contact électrique entre le pad court-circuiteur et le pad de surface à l'état ON, l'isolation électrique à l'état OFF etc. D'autres domaines pourraient bénéficier des avantages d'un tel microactuateur bistable capable de réaliser de grandes déflexions. Par exemple, l'extrémité recourbée du microactuateur pourrait être utilisé, en ajoutant un revêtement parfaitement réfléchissant, comme micro-miroir pour effectuer des commutations entre des signaux acheminés au moyen de fibres optiques [102], ce qui en ferait un composant de type MOEMS (système micro-opto-électro-mécanique).

Finalement, mentionnons qu'une partie des résultats des travaux de recherche présentés dans cette thèse ont fait l'objet de publications dans des revues avec comité de lecture ainsi que différentes communications dans des conférences/workshops dont la liste est présentée dans l'annexe H et que, d'autres publications sont à venir.

RÉFÉRENCES

[1] SZE, S.M. (1988). VLSI Technology. McGraw-Hill Book Company.

[2] MOORE, G.E. (1965). Cramming more components onto integrated circuits. Electronics Magazine, 38, no.8, 114-117.

[3] FEYNMAN, R.P. (1992). There's plenty of room at the bottom. Journal of Microelectromechanical Systems, 1, no.1. Mar, 60-66.

[4] PETERSEN, K.E. (1982). Silicon as a mechanical material. Proceedings of the IEEE, 70, no.5, 420-457.

[5] MALUF, N. (2000). An introduction to microelectromechanical systems engineering. Artech House.

[6] KOVACS, G.T.A. (1998). Micromachined Transducers Sourcebook. WCB/McGraw-Hill.

[7] RAI-CHOUDHURY, P. (1997). Handbook of microlithography, micromachining, and microfabrication . SPIE Optical Engineering Press. Institution of Electrical Engineers.

[8] LIU, C., TSAO, T., TAI, Y.-C., et HO, C.-M. (1994). Surface Micromachined Magnetic Actuators. Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop (MEMS '94), Oiso, Japan, 57-62.

[9] MADOU, M.J. (1997). Fundamentals of microfabrication. CRC Press.

[10] IN-STAT/MDR. (2002). It's Raining MEMS: 2002 Industry Overview, Report of In-Stat/MDR.

[11] NEXUS. (2002). Nexus Market Analysis for microsystems 2000-2005, Report of Nexus.

[12] MENZ, W., MOHR, J. et PAUL, O. (2001). Microsystem Technology. Wiley-Vch.

[13] WOLF, B. et TAUBER, R.N. (1986). Silicon Processing for the VLSI Era, Vol.1 - Process Technology. Lattice Press.

[14] HSU, T.-R. (2002). MEMS & microsystems: design and manufacture. McGraw-Hill Higher Education.

[15] SCHUEGRAF, K.K. (1988). Handbook of thin-film deposition processes and techniques. Noyes Publications.

[16] OHRING, M. (1992). The Materials Science of Thin Films. Academic Press Inc.

[17] YAO, T.-J., YANG X., et TAI, Y.-C. (2001). BrF_3 dry release technology for large freestanding parylene MEMS. Proc. Transducers'01, 652-655.

[18] BRIAND, D. (1997). Optimisation et intégration de couches minces de SnO (Pd) sensibles au CO obtenues par dépôt chimique en phase vapeur à partir d'un aérosol. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada.

[19] MARUSIC, J.-C. (1997). Fabrication et caractérisation de capteurs potentiométriques à électrolyte solide pour la détection de CO_2 gazeux. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada.

[20] LESSNICK, P. (1997). Transistors et résistances moléculaires à base de phtalocyanine pour la détection de l'ozone. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada.

[21] LECLERC, S. (2000). Capteurs thermiques micro-usinés: Analyse et proposition d'une nouvelle technique de conception et de fabrication. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada.

[22] CURRIE, J.F., IVANOV, D., et LECOURS, A. (1995). Implantable medication dispensing device, US Patent No. 5,366,454, PCT No. CA94/00132.

[23] ANTAKI, R. (1996). Intégration de la gravure anisotrope du silicium dans la fabrication d'un micro-administrateur pharmaceutique. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada.

[24] RESSEJAC, I. (1997). Intérêt d'un micro-administrateur pharmaceutique et étude de la biocompatibilité du NiTi. Rapport de projet du cours: Introduction aux biomatériaux, École Polytechnique, Montréal.

[25] WALKER, J.A. (2000). The future of MEMS in telecommunication networks. J. Micromechanics and Microengineering, 10, R1-R7.

[26] PAYNE, R.S. (2000). MEMS commercialization: ingredients for success. Proc. 13th IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop (MEMS '00), Miyazaki, Japan, 7-10.

[27] PETERSEN, K.E. (1979). Micromechanical membrane switches on Silicon. IBM J. Research and Development, 23, 376-385.

[28] GRÉTILLAT, M.-A., THIÉBAUD, P., DE ROOIJ, N.F., et LINDER, C. (1994). Electrostatic polysilicon microrelays integrated with MOSFETs. Proc. 7th IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop (MEMS '94), Oiso, Japan, 97-101.

[29] DRAKE, J.D., JERMAN, H., LUTZE, B., et STUBER, M. (1995). An electrostatically actuated micro-relay. Proc. 8th Int. Conf. Solide-State Sensors and Actuators (Transducers '95), Stockholm, Sweden, 380-383.

[30] ROY, S. et MEHREGANY, M. (1995). Fabrication of electrostatic nickel microrelays by nickel surface micromachining. Proc. 8th IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop (MEMS '95), Amsterdam, The Netherlands, 353-357.

[31] YAO, J.J. et CHANG, M.F. (1995). A surface micromachined miniature switch for telecommunications applications with signal frequencies up to 4 GHz. Proc. 8th Int. Conf. Solide-State Sensors and Actuators (Transducers '95), Stockholm, Sweden, 384-387.

[32] SATTLER, R., VOIGT, P., PRADEL, H. et WACHUTKA, G. (2001). Innovative design and modelling of a micromechanical relay with electrostatic actuation. J. Micromechanics and Microengineering, 11, 428-433.

[33] HOSAKA, H., KUWANO, H., et YANAGISAWA, K. (1993). Electromagnetic microrelays: concepts and fundamental characteristics. Proc. 6th IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop (MEMS '93), Fort Lauderdale, Florida , 12-17.

[34] HASHIMOTO, E., UENISHI, Y., et WATABE, A. (1995). Thermally controlled magnetization microrelay. Proc. 8th Int. Conf. Solide-State Sensors and Actuators (Transducers '95) , Stockholm, Sweden , 361-364.

[35] TAYLOR, W.P., ALLEN, M.G., et DAUWALTER, C.R. (1996). A fully integrated magnetically actuated micromachined relay. Technical Digest of the 1994 Solid States Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, South Carolina, 231-234.

[36] SCHIELE, I., HUBER, J., EVERS, C., HILLERICH, B. et al. (1997). Micromechanical relay with electrostatic actuation. Proc. 9th Int. Conf. Solide-State Sensors and Actuators (Transducers '97) , Chicago, USA, 1165-1168.

[37] SIMON, J., SAFFER, S. et KIM, C.-J. (1997). A liquid-filled microrelay with a moving mercury microdrop. J. Microelectromechanical Systems, 6, no.3, 208-216.

[38] RUAN, M., SHEN, J. et WHEELER, C.B. (2001). Latching microelectromagnetic relays. Sensors and Actuators A, 91, no.3, 346-350.

[39] QIU, J., LANG, J.H., et SLOCUM A.H. (2001). A centrally-clamped parallel-beam bistable MEMS mechanism. Proc. 14th IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop (MEMS '01), Interlaken, Switzerland, 353-356.

[40] MATOBA, H., ISHIKAWA, T., KIM, C.-J., et MULLER, R.S. (1994). A bistable snapping microactuator. Proc. 7th IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop (MEMS '94), Oiso, Japan, 45-50.

[41] YANG, Y.-J. et KIM, C.-J. (1995). Testing and characterization of a bistable snapping microactuator based on thermo-mechanical analysis. International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX, Proceedings, 337-340.

[42] SUN, X.-Q., FARMER, K.R., et CARR, W.N. (1998). A bistable microrelay based on two-segment multimorph cantilever actuators. Proc. 11th IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '98) Workshop, Heidelberg, Germany, 154-159.

[43] PAN, C.S. et HSU, W. (1997). An electro-thermally and laterally driven polysilicon microactuator. J. Micromechanics Microengineering, 7, 7-13.

[44] SEKI, T., SAKATA, M., NAKAJIMA, T., et MATSUMOTO, M. (1999). Thermal buckling actuator for micro relays. Proc. 9th Int. Conf. Solide-State Sensors and Actuators (Transducers '97) , Chicago, USA, 1153-1156.

[45] SCHIELE, I. et HILLERICH, B. (1999). Comparison of lateral and vertical switches for application as microrelays. Journal of Micromechanics and Microengineering, 9, 146-150.

[46] BALTES, H. (1997). CMOS micro electro mechanical systems. Sensors and Materials, 9, no.6, 331-346.

[47] BALTES, H., PAUL, O. et BRAND, O. (1998). Micromachined thermally based CMOS Microsensors. Proc. of the IEEE, 86, no.8, 1660-1678.

[48] WITVROUW A., VAN STEENKISTE, F., MAES, D., HASPESLAGH, L., et al. (2000). Why CMOS-integrated transducers ? A review. Microsystem Technologies, 6, no.5, 192-199.

[49] GRABIEC, P.B., GOTSZALK, T., SHI, F., HUDEK, P., et al. (1997). The integration of CMOS with plasma-enhanced micromachining. Surface and Coatings Technology, 97, 475-480.

[50] EATON, W.P. et SMITH, J.H. (1996). A CMOS-compatible, surface-micromachined pressure sensor for aqueous ultrasonic application. Proc. SPIE Smart Structures and Materials, 258-265.

[51] BUSTILLO, J.M., HOWE, R.T. et MULLER, R.S. (1998). Surface micromachining for microelectromechanical systems. Proc. of the IEEE, 86, no.8, 1552-1574.

[52] GIANCHANDANI, Y.B., KIM, H., SHINN, M., HA, B. et al. (1998). A MEMS-first fabrication process for integrating CMOS circuits with polysilicon microstructures. Proc. 11th IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '98) Workshop, Heidelberg, Germany, 257-262.

[53] SMITH, J.H., MONTAGUE, S., SNIEGOWSKI, J.J., MURRAY, J.R. et al. (1995). Embedded micromechanical devices for the monolithic integration of MEMS with CMOS. IEDM Tech. Digest, 609-612.

[54] TILMANS, H.A.C., BAERT, K., VERBIST, A. et PUERS, R. (1996). CMOS foundry-based micromachining. J. Micromech. Microeng., 6, 122-127.

[55] REAY, R.J., KLAASSEN, E.H., STORMENT, C., AUDY, J., et al. (1994). Thermally and electrically isolated single crystal silicon structures in CMOS technology. IEEE Electron Device Letters, 15, no.10, 399-401.

[56] LIEW, L.-A. et BRIGHT, V.M. (2000). Disposable CMOS catheter-tip pressure sensor for intracranial pressure measurement. Proc. 1st Annual International IEEE-EMBS Special Topic Conference on Microtechnologies in Medecine and Biology, Lyon, France, 130-135.

[57] LUO, H., ZHANG, G., CARLEY, R. et FEDDER, G.K. (2002). A post-CMOS micromachined lateral accelerometer. J. Microelectromechanical Systems, 11, no.3, 188-195.

[58] PARAMESWARAN, M., RISTIE, LJ., ROBINSON, A.M., CHAU, K. et al. (1990). CMOS electrothermal microactuators. Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Workshop (MEMS '90), 128-131.

[59] SOCHER, E., BOCHOBZA-DEGANI, O. et NEMIROVSKY, Y. (2001). A novel spiral CMOS compatible micromachined thermoelectric IR microsensor. J. Micromech. Microeng., 11, 574-576.

[60] KOLESAR, E.S., ALLEN, P.B., HOWARD, J.T., WILKEN, J.M., et al. (1999). Thermally-actuated cantilever beam for achieving large in-plane mechanical deflections. Thin Solid Films, 355, 295-302.

[61] PARAMESWARAN, M., RISTIE, LJ., ROBINSON, A.M., CHAU, K., et al. (1991). Electrothermal microactuators in standard CMOS process. Sensors and Materials, 2, no.4, 197-205.

[62] BENECKE, W. et RIETHMÜLLER, W. (1989). Applications of silicon-microactuators based on bimorph structures. Proc. IEEE 2nd Micro Electro Mechanical Systems Workshop (MEMS '89), Salt Lake City, USA, 116-120.

[63] DÖRING, C., GRAUER, T., MAREK, J., METTNER, M.S. et al. (1992). Micromachined thermoelectrically driven cantilever structures for fluid jet deflection. Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '92), Travemünde, Germany, 12-18.

[64] ATAKA, M., OMODAKA, A., TAKESHIMA, N. et FUJITA, H. (1993). Fabrication and operation of polymide bimorph actuators for a ciliary motion system. J. Microelectromechanical Systems, 2, no.4, 146-150.

[65] GOLDMAN, K. et MEHREGANY, M. (1995). A novel micromechanical temperature memory sensor. Proc. 8th Int. Conf. Solide-State Sensors and Actuators (Transducers '95), Stockholm, Sweden, 132-135.

[66] LIN, G., KIM, C.-J., KONISHI, S., et FUJITA, H. (1995). Design, fabrication, and testing of C-shape actuator. Proc. 8th Int. Conf. Solide-State Sensors and Actuators (Transducers '95), Stockholm, Sweden, 416-419.

[67] OK, J., CHU, M., et KIM, C.-J. (1999). Pneumatically driven microcage for micro-objects in biological liquid. Proc. 12th Micro-Electro-Mechanical Systems Workshop (MEMS '99), Orlando, USA, 459-463.

[68] KOLESAR, E.S., RUFF, M.D., KO, S.Y., WILKS, J.T. et al. (2001). Design and performance of a polysilicon surface micromachined microengine realized with arrays of asymmetrical electrothermal microactuators. Proc. of the SPIE Conference on MEMS Design, Fabrication, Characterization, and Packaging, Vol. 4407, Edinburgh, Scotland, 310-321.

[69] SEHR, H., EVANS, A.G.R.B.A., ENSELL, G.J. et NIBLOCK, T.E.G. (2001). Fabrication and test of thermal vertical bimorph actuators for movement in the wafer plane. J. Micromech. Microeng., 11, 306-310.

[70] RASHIDIAN, B. et ALLEN, M.G. (1993). Electrothermal microactuators based on dielectric loss heating. Proc. 6th IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop (MEMS '93), Fort Lauderdale, Florida, 24-29.

[71] TIMOSHENKO, S.(1925). Analysis of bimetal thermostats. J. of the Optical Society of America , 11, 233-255.

[72] CHU, W.-H., MEHREGANY, M. et MULLEN, R.L. (1993). Analysis of tip deflection and force of a bimetallic cantilever microactuator. J. Micromechanics and Microengineering, 3, 4-7.

[73] BAZERGUI, A. (1993). Résistance des matériaux. Editions de l'Ecole polytechnique de Montréal.

[74] RIETHMULLER, W. et BENECKE, W. (1988). Thermally excited silicon microactuators. IEEE Transactions on Electron Devices, 758-763.

[75] LATORRE, L. et NOUET, P. (1999). A complete methodology for electro-mechanical characterization of a CMOS compatible MEMS technology. IEICE Trans. Electron., E82-C, no.4, 582-588.

[76] EYGLUNENT, B. (1997). Manuel de thermique théorie et pratique. Hermès.

[77] HSU, T.-R. (2002). MEMS and microsystems design and manufacture. McGraw-Hill.

[78] INCROPERA, F.P. et DEWITT, D.P. (2002). Fundamentals of heat and mass transfer. John Wiley & Sons inc.

[79] ARX, M.V., PAUL, O. et BALTES, H. (2000). Process-dependent thin-film thermal conductivities for thermal CMOS MEMS. J. Microelectromechanical Systems, 9, no.1, 136-145.

[80] CANADIAN MICROELECTRONICS CORPORATION (1995). An introduction to micromachining: results of projects using Mitel's 1.5-micron CMOS technology to develop a canadian MEMS process. Report IC 95-08.

[81] TEA, N.H., MILANOVIC, V., ZINCKE, C.A., SUEHLE, J.S., et al. (1997). Hybrid postprocessing etching for CMOS-compatible MEMS. Journal of Microelectromechanical Systems, 6, no.4, 363-372.

[82] RESSEJAC, I.C., LANDSBERGER, L.M. et CURRIE, J.F. (2000). Bistable microelectrothermal actuator in a standard complementary metal-oxide-semiconductor process. Journal of Vacuum Science and Technology, Part A: Vacuum, Surfaces and Films, 18, 746-749.

[83] RESSEJAC, I.C., LANDSBERGER, L.M., CURRIE, J.F., et ISNARD, L.(2002). Micromachining and operation of a bistable electrothermal actuator. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 27, no.1. January, 41-45.

[84] PARANJAPE, M., PANDY, A., LANDSBERGER, L., KAHRIZI, M., et al. (2000). Dual-doped TMAH silicon etchant for microelectromechanical structures and systems applications. J. Vac. Sci. Technol. A, 18, no.2, 738-742.

[85] CHANG, F.I., YEH, R., LIN, G., CHU, P.B. et al. (1995). Gas-phase silicon micromachining with xenon difluoride. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 117-128.

[86] PANDY, A., LANDSBERGER, L.M. et KAHRIZI, M. (1999). Mask-under-etch experiments of Si{110} in TMAH. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 3, 1621-1626.

[87] LANDSBERGER, L.M., NASEH, S., KAHRIZI, M. et PARANJAPE, M. (1996). On hillocks generated during anisotropic etching of Si in TMAH. Journal of Microelectromechanical Systems, 5, 106-116.

[88] ELALAMY, Z., LANDSBERGER, L.M., KAHRIZI, M., PANDY, A., et al. (2003). Modelling of anisotropic etching of silicon: anomalies due to facet boundary effects. Sensors and Materials, 15, no.2, 67-81.

[89] RESSEJAC, I.C., LANDSBERGER, L.M., CURRIE, J.F. et ISNARD, L. (2002). Micromachining and operation of a bistable electrothermal actuator. Can. J. Elect. Comput. Eng., 27, no.1, 41-45.

[90] KIM, J.-W., KIM, Y.-C. et LEE, W.-J. (1995). Reactive ion etching mechanism of plasma enhanced chemically vapor deposited aluminum oxide film in CF_4/O_2 plasma. J. Appl. Phys., 78, no.3, 2045-2049.

[91] JUDY, J.W., TAMAGAWA, T., et POLLA, D.L. (90). Surface micromachined linear thermal microactuator. International Electron Devices Meeting 1990. Technical Digest (Cat. No.90CH2865-4), 629-632.

[92] CAO, K., LIU, W. et TALGHADER J.J. (2001). Curvature compensation in micromirrors with high-reflectivity optical coatings. Journal of Microelectromechanical systems, 10, no.3, 409-418.

[93] BURGREEN, D. (1971). Elements of thermal stress analysis. C.P. Press.

[94] SAIF, M.T.A. et MACDONALD, N.C. Planarity of large MEMS. Journal of Microelectromechanical Systems, 5, no.2, 79-97.

[95] BARONCINI, M., PLACIDI, P., SCORZONI, A., et al. (2001). Characterization of an embedded micro-heater for gaz sensors applications. Proc. Int. Symposium on VLSI Technology, Syst. Appl. (2001 VLSI-TSA) of IEEE, 164-167.

[96] LIU, D.-S. et NI, C.-Y. (2002). A thermo-mechanical study on the electrical resistance of aluminum wire conductors. Microelectronics Reliability, 42, no.3, 367-374.

[97] CIOFI, C. et DI PASCOLI, S. (1997). Temperature coefficient of resistance fluctuations during electromigration in Al lines. Microelectron. Reliab., 37, no.1, 77-85.

[98] HERMAN, D., GAITAN, M., et DEVOE D. (2001). MEMS test structures for mechanical characterization of VLSI thin films. Proc. Society of Experimental Mechanics, Mechanics and Measurement Symposium, Portland, Oregon.

[99] FRANÇA, D.R., (2002). Generation and detection of resonance modes of cantilever beams. Report from Industrial Materials Institute, National Research Council Canada ,

[100] CHU, P.B., CHEN, J.T., YEH, R., LIN, G. et al. (1997). Controlled pulse-etching with xenon difluoride. International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Proceedings, 665-668.

[101] FREEMAN, D.M., TROXEL, D.E., HEMMERT, W., et MCLLRATH, M.B. (2001). Computer Microvision for Microelectromechanical Systems. Rep141-III.3.1

[102] CHEN, R.T., NGUYEN, H. et WU, M.C. (1999). A high-speed low-voltage stress-induced micromachined 2 x 2 optical switch. IEEE Photonics Technology Letters, 11, no.11, 1396-1999.

[103] SCHNAKENBERG, U., BENECKE, W., et LANGE, P. (1991). TMAHW etchants for silicon micromachining. Proc. 6th Int. Conf. Solide-State Sensors and Actuators (Transducers '91), San Francisco, 815-818.

[104] SATO, K., SHIKIDA, M., YAMASHIRO, T., ASAUMI, K. et al. (1998). Anisotropic etching rates of single-crystal silicon for TMAH water solution as a function of crystallographic orientation. Proc. 11th IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '98) Workshop, Heidelberg, Germany, 556-561.

[105] CHOI, W.S. et SMITS, J.G. (1993). A method to etch undoped silicon cantilever beams. J. Microelectromechanical Systems, 2, no.2, 82-86.

[106] STEINSLAND, E., NESE, M., HANNEBORG, A., BERNSTEIN, R.W., et al. (1996). Boron etch-stop in TMAH solutions. Sensors and Actuators A, 54, 728-732.

[107] TSAUR, J.-J., DU, C.-H. et LEE, C. (2001). Investigation of TMAH for front-side bulk micromachining process from manufacturing aspect. Sensors and Actuators A, 92, 375-383.

[108] TABATA, O. (1996). pH-controlled TMAH etchants for silicon micromachining. Sensors and Actuators A, 53, 335-339.

[109] YAN, G., CHAN, P.C.H., HSING, I.-M., SHARMA, R.K., et al. (2001). An improved TMAH Si-etching solution without attacking exposed aluminium. Sensors and Actuators A, 89, 135-141.

[110] WILLIAMS, K.R.. (1996). Etch rates for micromachining processing. J. Microelectromech. Systems, 5, no.4, 256-269.

[111] JANSEN, H., GARDENIERS, H., DE BOER, M., ELWENSPOEK, M., et al. (1996). A survey on the reactive ion etching of silicon in microtechnology. J. Micromech. Microeng., 6, 14-28.

[112] MONCHALIN, J.-P. (1986). Optical detection of ultrasound. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Control, 33, no.5, 485-499.

ANNEXE A

IMPLÉMENTATION DE DIFFERENTS DESIGNS AU PROCEDE STANDARD CMOS

A.1 Procédure pour la fabrication de dispositifs via la CMC

La procédure pour la fabrication de composant MEMS débute par une demande de subvention dans laquelle le concepteur doit justifier l'objet et l'intérêt de sa soumission pour sa recherche universitaire. Cette demande est analysée par un comité de la CMC qui peut attribuer l'espace d'un dé, généralement de 3 mm par 3 mm, pour permettre la fabrication de designs provenant de différentes universités sur une même série de fabrication. Après l'acceptation de la demande de subvention, le concepteur dispose d'un délai de 3 mois pour réaliser les plans de masques et les soumettre à la CMC. La soumission du design doit être accompagnée d'une description du contenu du design, les outils CAD utilisés pour la conception des plans de masque et la vérification des règles de design. Les règles de design non respectées intentionnellement (par exemple, pour la conception de structures MEMS avec une technologie conçue pour la fabrication de circuits intégrés) doivent toutes être indiquées. Des informations supplémentaires telles que l'utilisation de services de post-traitement Can-MEMS, la quantité de dés nécessaires et la mise en boîtier ou non des dés doivent également être indiquées à chaque soumission de design.

A.2 Code d'identification des designs et des séries de fabrication

Les séries de fabrication pour une année sont généralement au nombre de trois et identifiées de la façon suivante "0003CB"; les deux premiers chiffres se rapportant à l'année, les deux chiffres suivants indiquant le numéro de la série de fabrication pour cette année et les deux

dernières lettres précisant la technologie employée; en l'occurrence CB pour la technologie Mitel et MB pour cette même technologie plus le post-traitement Can-MEMS. De même, chaque soumission de design utilise un code d'identification du type "ICBPMAT5"; le I indiquant une soumission de design pour implémentation qui est remplacé par un D lorsque le design est soumis seulement pour une vérification des règles de design (DRC, design rules check); les deux lettres suivantes indiquent la technologie employée (CB ou MB), les deux lettres suivantes identifient l'institut universitaire du concepteur (PM pour l'École Polytechnique) tandis que les trois derniers caractères sont laissés au choix du concepteur pour identifier son design.

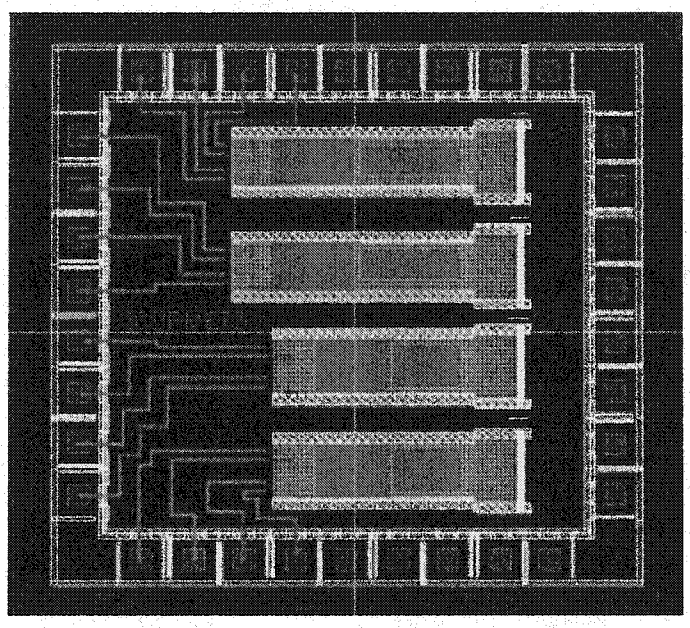
A.3 Différents designs implémentés au procédé CMOS

Cette annexe regroupe les différents designs qui ont été soumis au procédé de fabrication CMOS et au post-traitement Can-MEMS. Pour chaque design, le plan de masques dessiné avec le logiciel Cadence et le micrographe optique de l'échantillon après sa fabrication sont présentés. Le tableau suivant dresse la liste des différents designs qui ont été soumis à une série de fabrication Mitel 1,5 µm CMOS avec le post-traitement Can-MEMS pour certains.

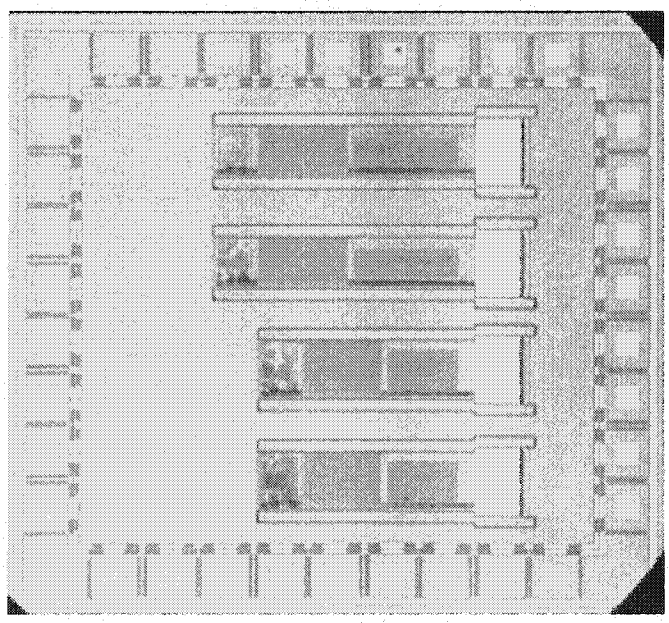
Tableau A.1: Implémentation de différentes générations de design au procédé CMOS.

Identification du design	Dimensions des échantillons (mm^2)	Procédé de fabrication	Soumission des masques	Réception des échantillons
ICBPMET3	3 x 3	9701CB	Fév. 97	Juin 97
IMBPMET4	3 x 3	9702MB	Juin 97	Mai 98
ICBPMET5	3 x 3	9702CB	Juin 97	Sept. 97
IMBPMET6	3 x 3	9703MB	Nov. 97	Août 98
IMBPMET7	3 x 3	9703MB	Nov. 97	Août 98
ICBPMET8	3 x 3	9703CB	Nov. 97	Mars 98
IMBPMET9	6 x 6	9801MB	Mars 98	Sept. 98
ICBPMAT2	3 x 3	9802CB	Sept. 98	Déc. 98
ICBPMAT3	3 x 3	9901CB	Mars 99	Janv. 00
ICBPMAT4	3 x 3	9901CB	Mars 99	Janv. 00
ICBPMAT5	9 x 9	0003CB	Août 00	Mai 01

Figure A.1: Design ICBPMET3 - série de fabrication 9701CB

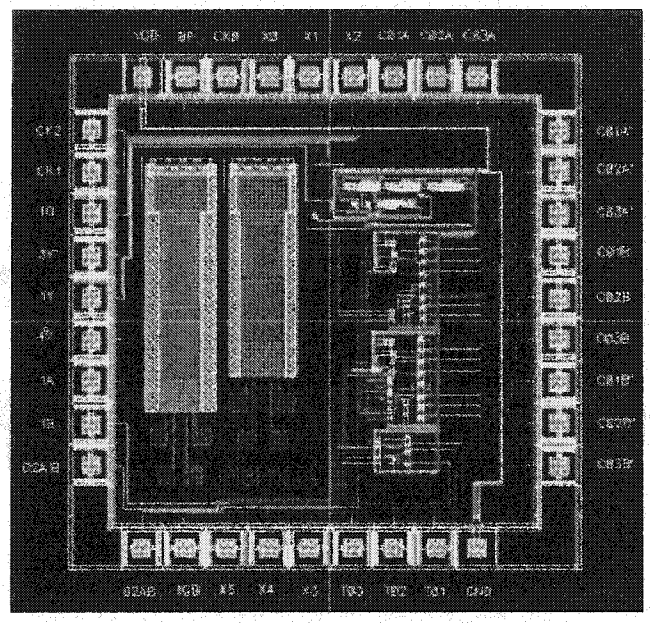


plan des masques (Cadence)

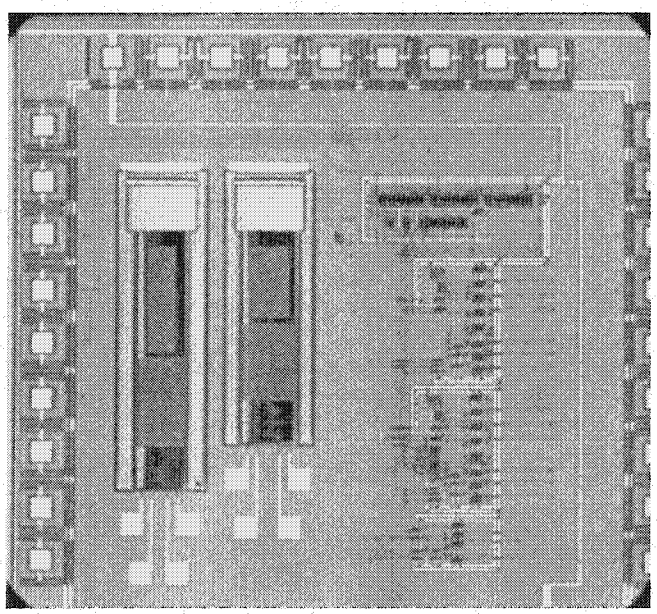


micrographie optique de l'échantillon

Figure A.2: Design IMBPMET4 - série de fabrication 9702MB

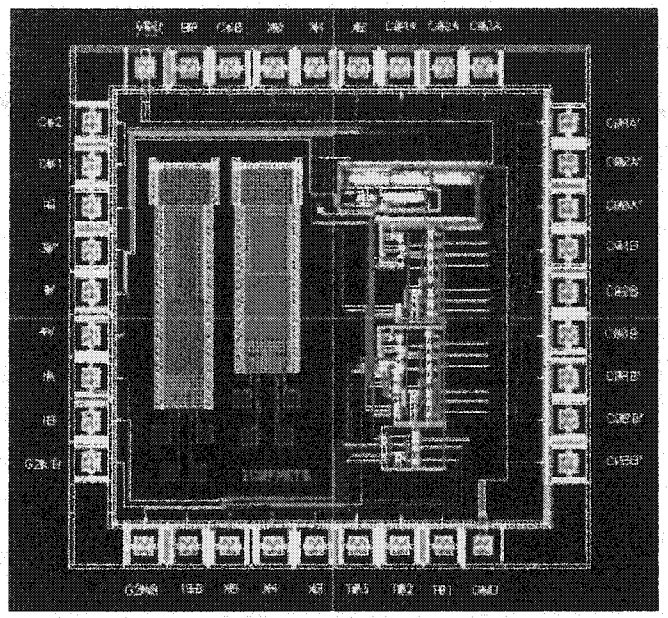


plan des masques (Cadence)

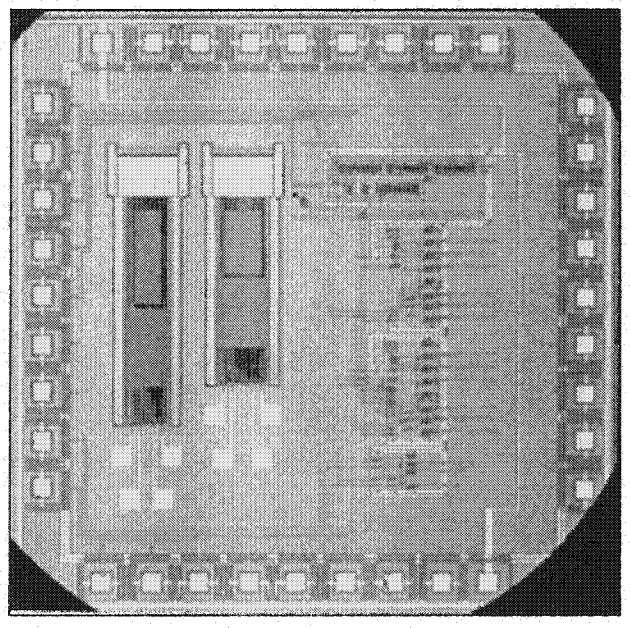


micrographie optique de l'échantillon

Figure A.3: Design ICBPMET5 - série de fabrication 9702CB

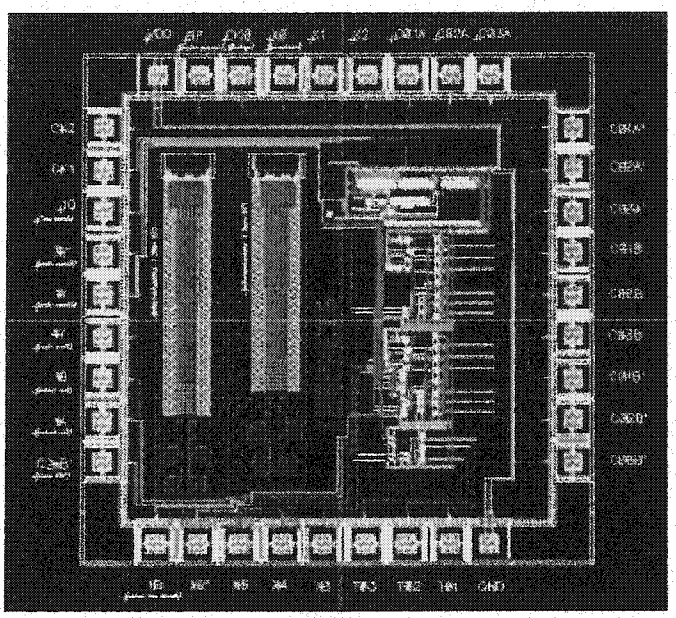


plan des masques (Cadence)

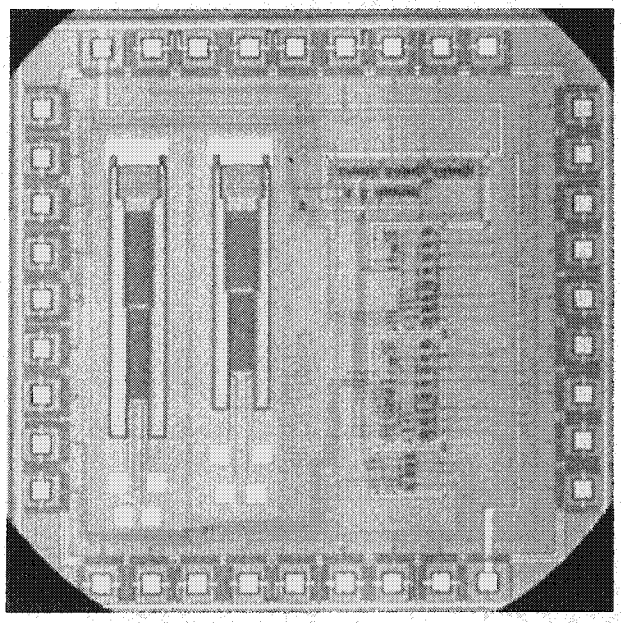


micrographie optique de l'échantillon

Figure A.4: Design IMBPMET6 - série de fabrication 9703MB

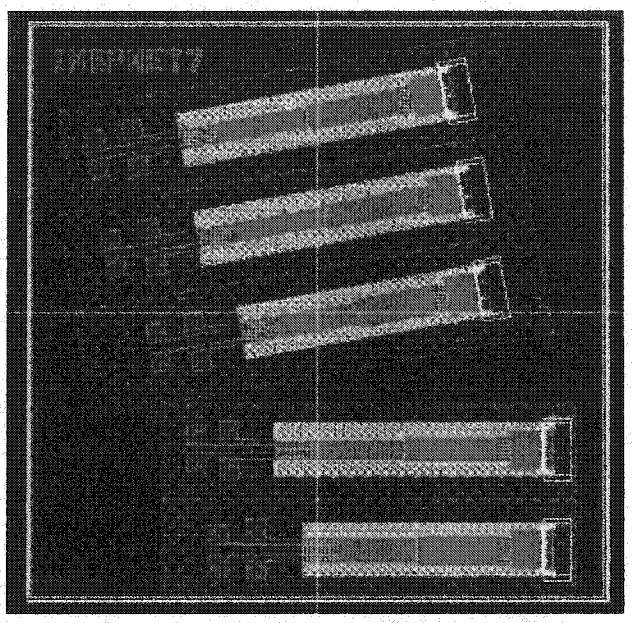


plan des masques (Cadence)

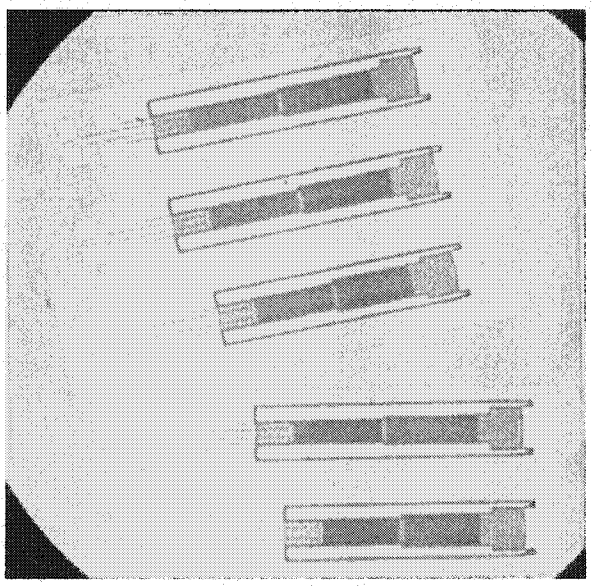


micrographie optique de l'échantillon

Figure A.5: Design IMBPMET7 - série de fabrication 9703MB

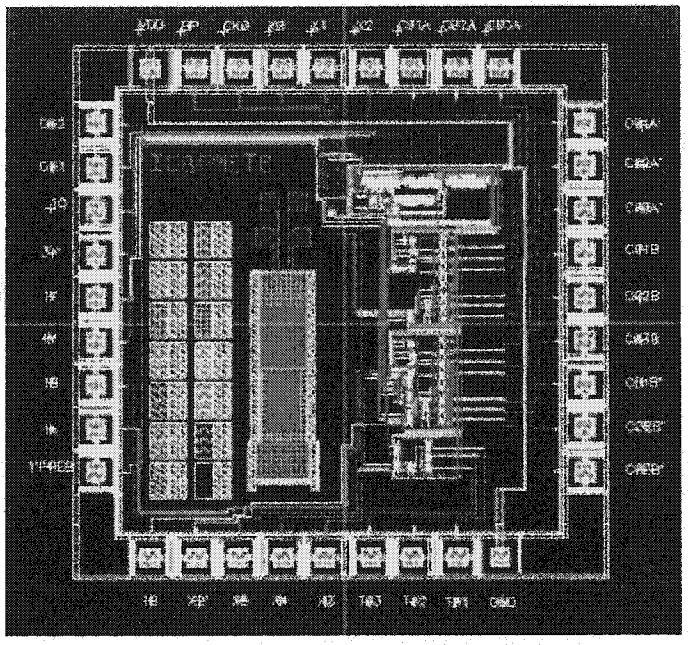


plan des masques (Cadence)

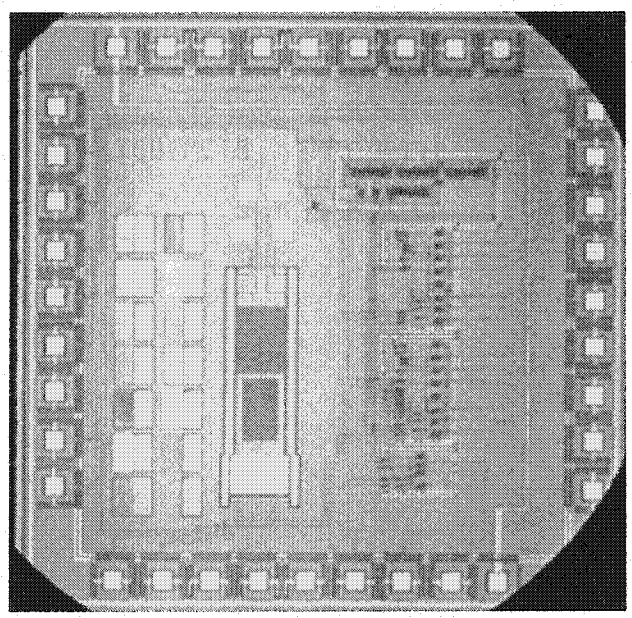


micrographie optique de l'échantillon

Figure A.6: Design ICBPMET8 - série de fabrication 9703CB

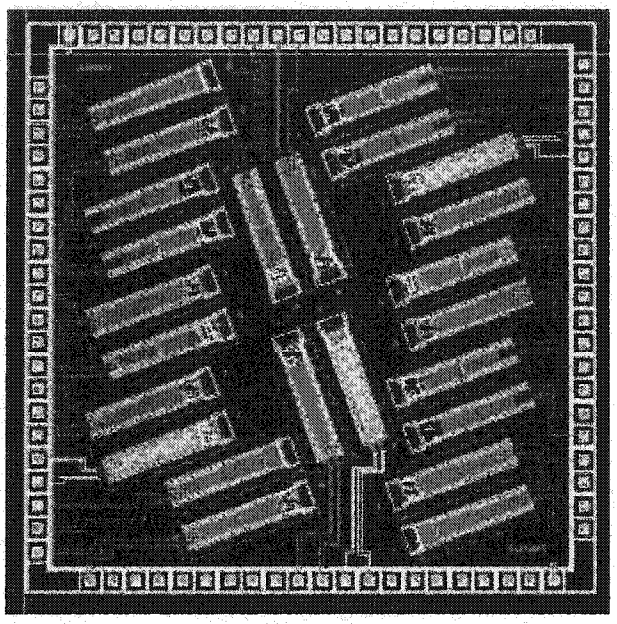


plan des masques (Cadence)

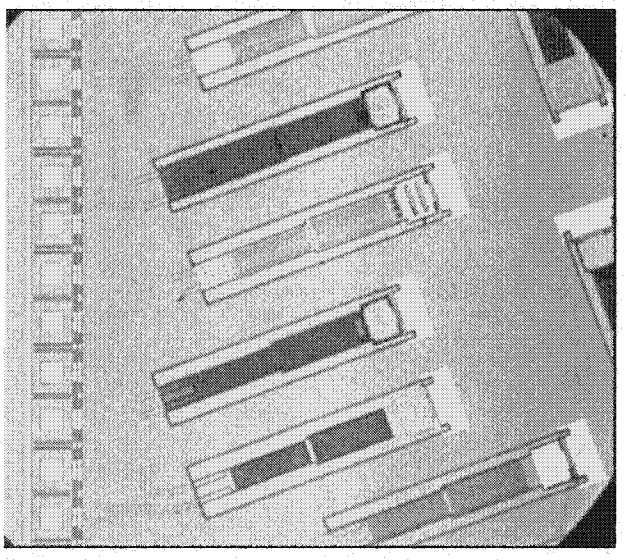


micrographie optique de l'échantillon

Figure A.7: Design IMBPMET9 - série de fabrication 9801MB

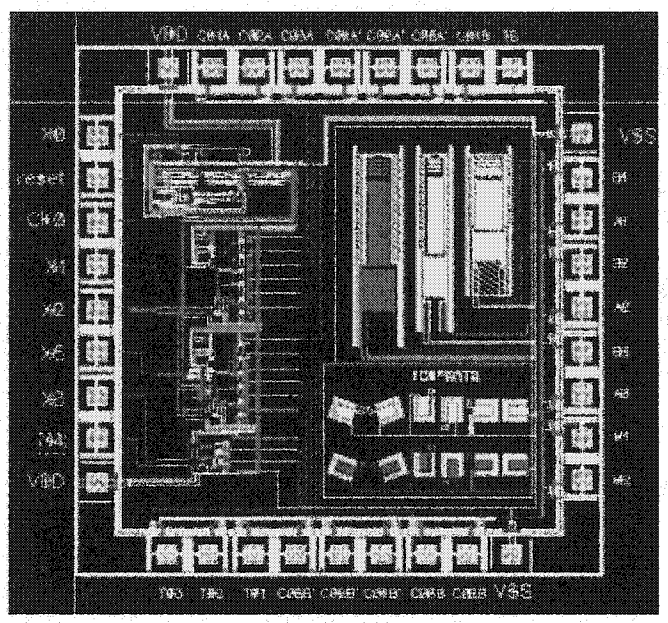


plan des masques (Cadence)

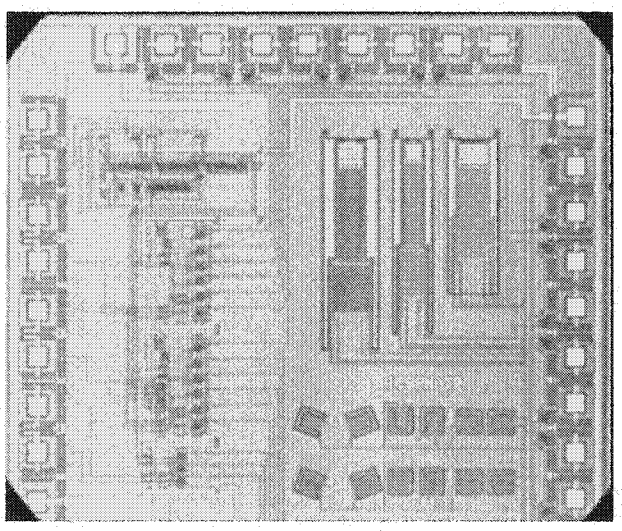


micrographie optique d'une partie de l'échantillon

Figure A.8: Design ICBPMAT2 - série de fabrication 9802CB

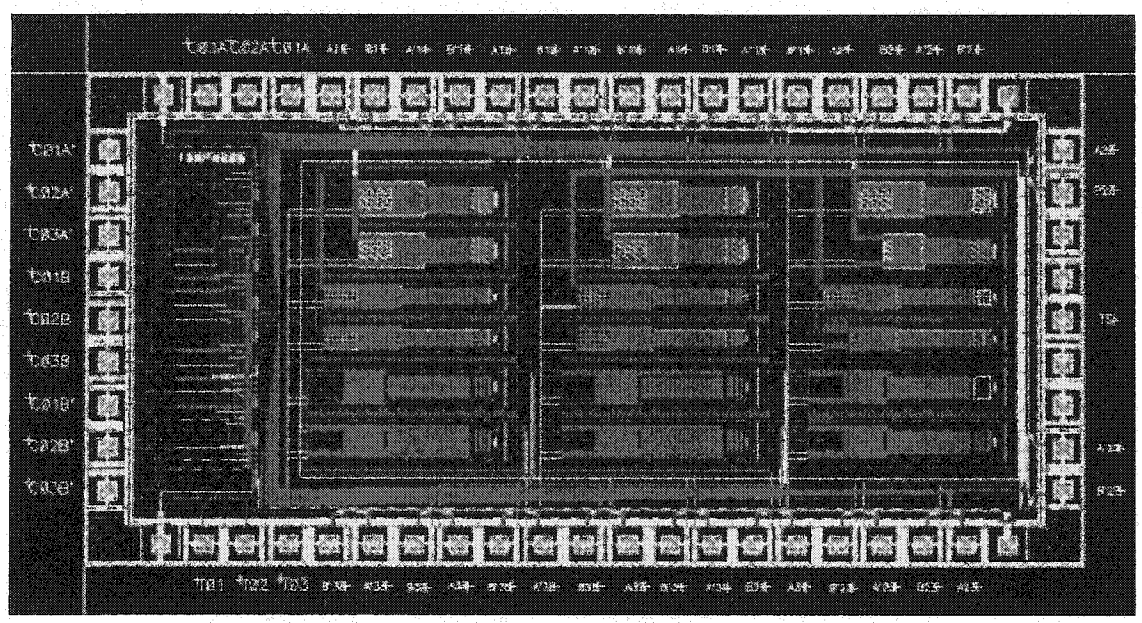


plan des masques (Cadence)

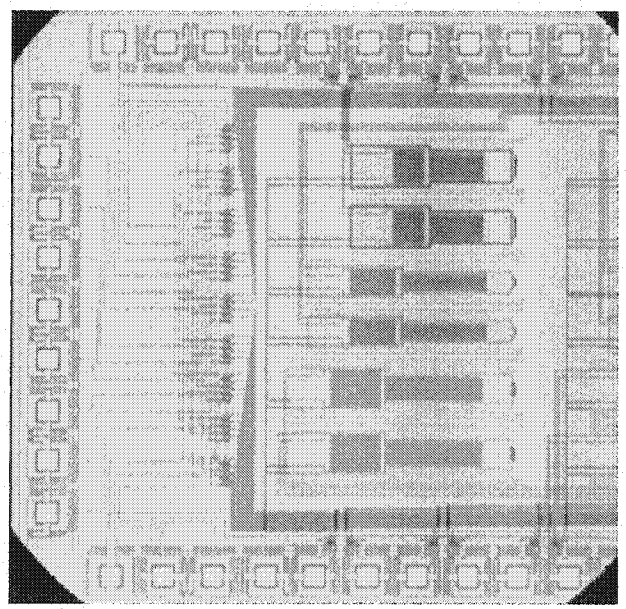


micrographie optique de l'échantillon

Figure A.9: Design ICBPMAT3 - série de fabrication 9901CB

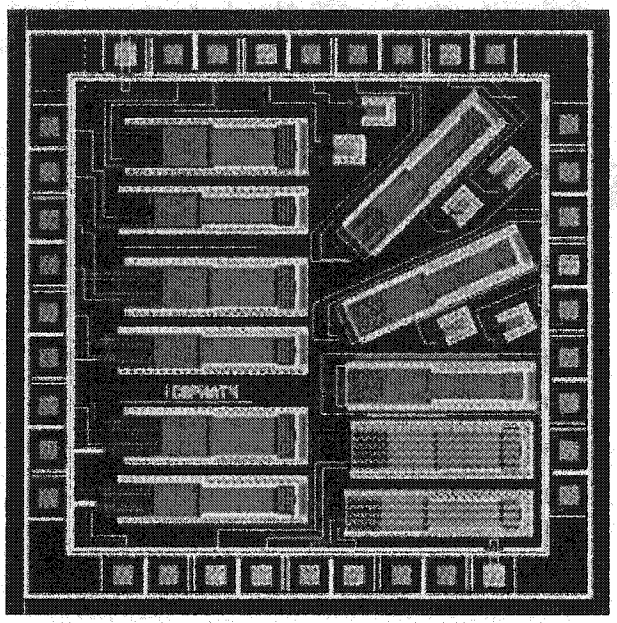


plan des masques (Cadence)

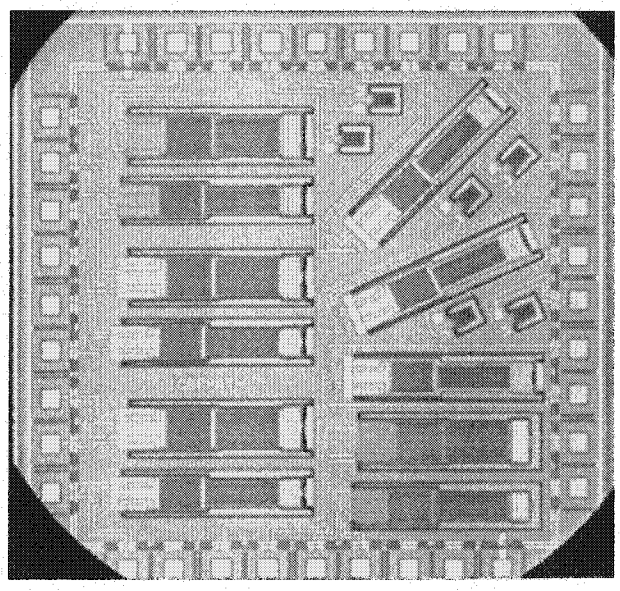


micrographie optique d'une partie de l'échantillon

Figure A.10: Design ICBPMAT4 - série de fabrication 9901CB

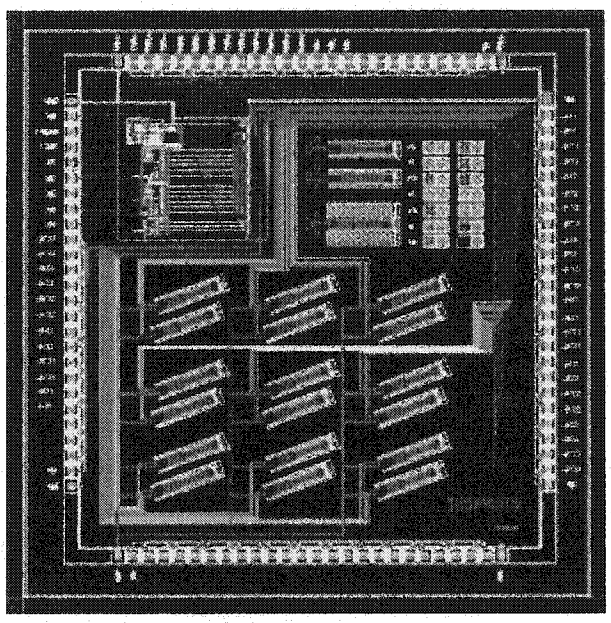


plan des masques (Cadence)

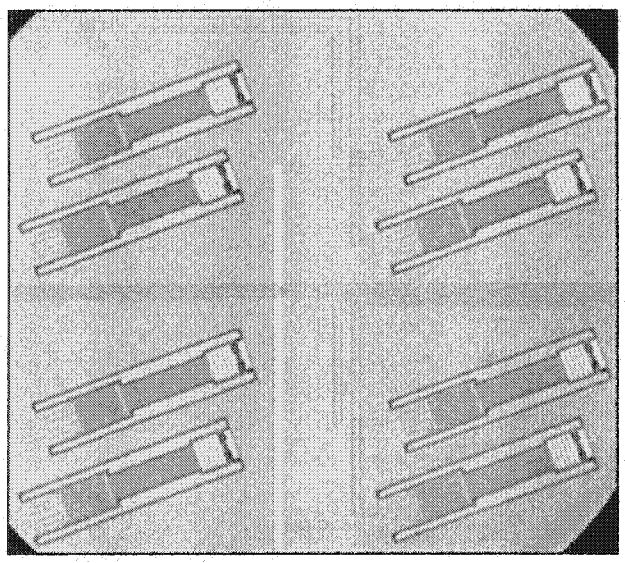


micrographie optique de l'échantillon

Figure A.11: Design ICBPMAT5 - série de fabrication 0003CB



plan des masques(Cadence)



micrographie optique d'une partie de l'échantillon

A.4 Post-traitements effectués sur les différents designs

Les différents designs soumis à la fabrication CMOS et les étapes de micro-usinage qui ont été effectuées en post-traitement sont indiqués dans le tableau suivant. En fonction des résultats expérimentaux obtenus, des actions correctives ont été implémentées d'une série de fabrication à une autre afin d'optimiser le design et le procédé de micro-usinage. Les principaux résultats expérimentaux discutés dans le chapitre 4 ont été obtenus lors du traitement de ces différentes générations de design. Rappelons que le design du microactuateur, la stratégie de microfabrication et les tests d'actuation présentés dans cette thèse correspondent à la version la plus récente du microactuateur, figurant dans le dernier design fabriqué ICBPMAT5.

Tableau A.2: Différentes générations de designs et techniques de micro-usinage effectuées en post-traitement.

Identification du design	Pt	TMAH	XeF_2	RIE
ICBPMET3		X		
IMBPMET4	X	X		
ICBPMET5		X		
IMBPMET6	X	X	X	
IMBPMET7	X	X	X	
ICBPMET8		X		
IMBPMET9	X	X		
ICBPMAT2		X	X	
ICBPMAT3	X	X	X	
ICBPMAT4		X	X	
ICBPMAT5	X	X	X	X

ANNEXE B

CONCEPTION DU SYSTÈME D'ADRESSAGE MICROÉLECTRONIQUE DE LA MATRICE D'ACTUATEURS

Le système d'adressage microélectronique a pour rôle de commander l'actuation des micro-relais situés aux intersections des lignes d'entrées et de sorties (voir chapitre 1). Cet adresseur est représenté schématiquement sur la figure suivante pour une matrice 3 par 3 de micro-relais.

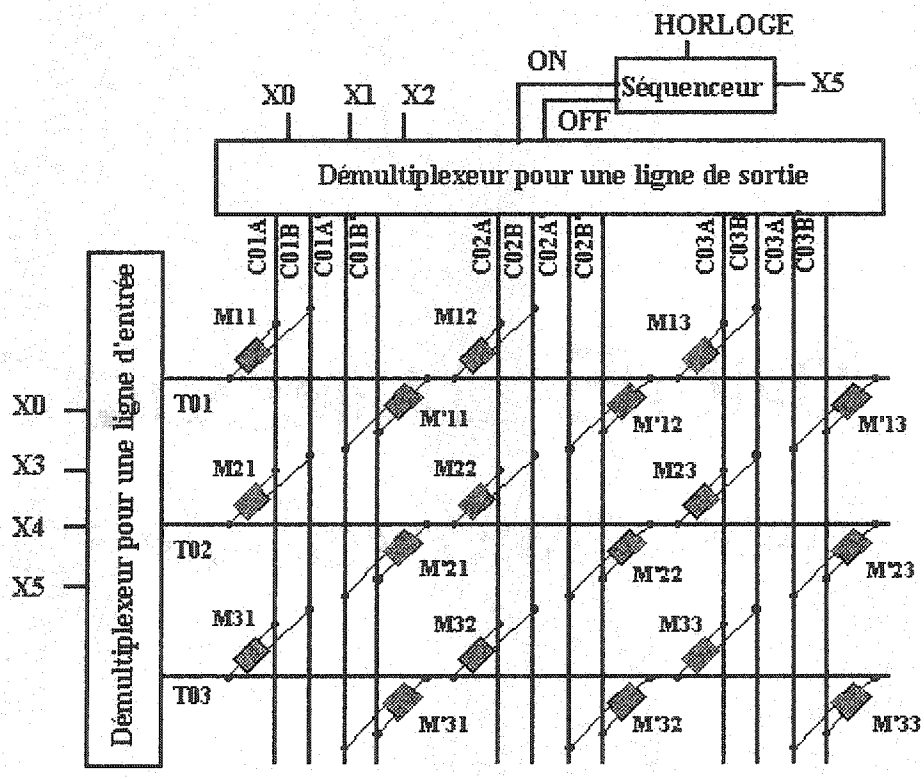


Figure B.1: Schéma de la matrice 3 par 3 de micro-relais avec le système d'adressage.
Étant donné que l'on dispose deux microactuateurs par intersection, l'adresseur va envoyer successivement deux séquences de signaux identiques afin d'établir la connexion entre les lignes d'entrée et de sortie préalablement sélectionnées. Pour sélectionner une entrée constituée d'une ligne aller Ei et d'une ligne retour Ei', il suffit d'y joindre une ligne de contrôle notée T0i (i = 1 à 3). Par contre, au niveau des sorties, les lignes aller Sj et les lignes retour Sj' nécessitent chacune deux lignes de contrôle pour alimenter les deux bilames de chaque actuateur. De cette façon, on note C0jA et C0jB les lignes de contrôle des bilames A et B des microactuateurs situés sur une ligne de sortie aller Sj. Tandis que C0jA' et C0jB' désignent les lignes de contrôle des bilames A' et B' des microactuateurs situés sur une ligne de sortie retour Sj'.

Toute l'information séquentielle externe, dont le système d'adressage a besoin est donnée sous la forme d'un signal binaire de 6 bits ($x_5\ x_4\ x_3\ x_2\ x_1\ x_0$). En effet pour $x_0 = 1$, l'adresseur doit laisser passer cette information (signal en parallèle) si la traduction du signal série en entrée a été correctement traduite par un bloc fonctionnel tel qu'un démultiplexeur temporel. Dans le cas où l'information serait erronée, $x_0 = 0$ et toute l'information est bloquée. De cette façon, l'état des microactuateurs reste inchangé. Les bits d'entrée ($x_4\ x_3$) et ($x_2\ x_1$) permettent d'adresser respectivement les lignes de contrôle d'entrée T0i et de sortie C0jA, C0jB, C0jA' et C0jB'. Ce sont les microactuateurs situés à l'intersection de ces lignes de contrôle qui effectueront une commutation. Enfin le dernier bit x_5 est nécessaire pour connaître l'état vers lequel les micro-relais vont commuter. Lorsque $x_5 = 1$, l'adresseur envoie une séquence de signaux spécifiques correspondants aux phases de chauffage et de refroidissement des bilames pour que le micro-relais passe à l'état ON. Tandis que pour $x_5 = 0$, le système d'adressage envoie une autre séquence de signaux permettant le passage à l'état OFF du microactuateur. Le système d'adressage doit, par ailleurs, être en mesure de laisser les commutateurs dans leur nouvel état jusqu'à la réception d'un nouveau signal d'entrée.

Le logiciel Cadence a permis d'effectuer des simulations sur les versions "schematic" et "layout" (plan des masques) de ce système d'adressage ainsi qu'une version utilisant un placement & routage automatique. Des tests électriques (IMS Logic Master XL) ont prouvé le bon fonctionnement du système d'adressage selon le type de signal introduit en entrée.

ANNEXE C

PRINCIPES DES TECHNIQUES DE MICROFABRICATION UTILISÉES EN POST-TRAITEMENT

C.1 Dépôt et mise en forme d'une couche mince de Pt par pulvérisation et lift-off

La pulvérisation cathodique (sputtering) est une technique de dépôt physique en phase vapeur (PVD, physical vapor deposition) qui consiste à déloger des atomes de la surface d'une cible solide, composée du matériau destiné à être déposé, par collision avec des ions créés dans un plasma de gaz neutre (Ar, N_2, He...) à basse pression. Le plasma est produit en appliquant une tension (AC ou DC) entre l'anode et la cathode.

La figure C.1 illustre un procédé de pulvérisation qui consiste généralement en quatre étapes [13]: 1) les ions générés sont accélérés vers la cible (solide) de même composition que la couche à déposer; 2) le flux d'ions pulvérise les atomes de la cible; 3) le transfert de l'énergie cinétique des ions du plasma permet d'éjecter les atomes de la cible qui sont ensuite projetés (phase gazeuse) sur le substrat; 4) où ils se condensent et constituent la couche mince. La figure C.1 présente le schéma d'un pulvérisateur composé de deux électrodes parallèles où sont situées la cible (cathode) et le substrat (anode) dans une chambre à basse pression. L'application d'une source de puissance DC générée le plasma et ionise les atomes d'Ar entre les électrodes. Dû au potentiel DC, les ions d'argon positifs sont accélérés vers la cathode où ils éjectent les atomes de la cible qui vont se condenser sur la surface du substrat.

Dans la fabrication de circuits VLSI, la pulvérisation est la technique la plus courante pour déposer des couches métalliques telles que l'aluminium et ses alliages, le titane, le platine, l'or, le chrome, le palladium et le tungstène. La pulvérisation peut également être utilisée pour le dépôt en couches minces de molybdène, de silicium, d'oxyde de silicium, etc. La pulvérisation est également une technique favorisée par la communauté des MEMS puisqu'elle peut être effectuée à des températures basses (<150°C) et permet d'obtenir des couches minces uniformes grâce à la grande taille de la cible par rapport à celle du substrat et au hasard directionnel relié au procédé de pulvérisation.

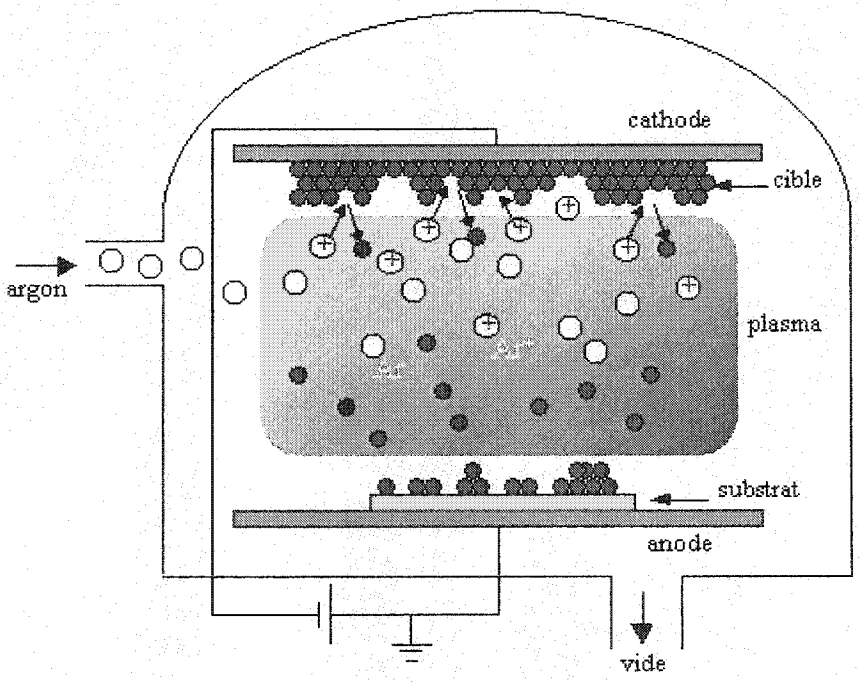


Figure C.1: Illustration d'un procédé de pulvérisation DC avec un plasma d'argon.

Les différents types d'équipement de pulvérisation existants diffèrent selon le type d'excitation ionique utilisé. Ainsi, dans une décharge DC, les ions sont accélérés entre la cible et la gaufre par un champ électrique DC (voir figure C.1). Pour une pulvérisation radio-fréquence (RF) plane, la cible et la gaufre forment des plateaux parallèles et une excitation RF est appliquée sur la cible [5]. Dans les cas de pulvérisation DC et RF, la plupart des électrons secondaires, émis à partir de la cible, ne causent pas d'ionisation avec les atomes de gaz inerte et sont collectés par l'anode et le substrat où ils causent un chauffage non désiré. Par conséquent,

les procédé de pulvérisation à diode DC et RF se caractérisent par des taux de dépôt peu élevés résultant d'un bombardement ionique et d'un taux de pulvérisation de la cible plus bas que si plus d'électrons étaient impliqués dans les collisions ionisantes [13]. Dans le cas d'une pulvérisation magnétron, l'application d'un champ magnétique externe permet d'augmenter le pourcentage d'électrons causant des collisions ioniques près de la cible ce qui augmente la vitesse de dépôt. De cette façon, les densités de courant peuvent atteindre jusqu'à 10-100 mA/cm^2, au lieu de 1 mA/cm^2 pour les configurations non-magnétron.

Le lift-off est une technique qui permet la mise en forme de motifs sur la surface d'un substrat selon un procédé additif à l'opposé du procédé soustractif utilisé dans la gravure [13]. Ainsi, pour les matériaux nobles tels que l'or ou le platine qui sont difficiles à graver ou pour les couches métalliques utilisées à des fins d'interconnexions, la technique du lift-off est souvent utilisée. La technique consiste à déposer initialement sur la surface du substrat une résine photosensible mise en forme par lithographie pour obtenir l'inverse du motif désiré. Par conséquent, les zones du substrat exposées correspondent aux motifs désirés. Prenons le cas de la mise en forme de motifs de platine déposé par pulvérisation sur toute la surface de l'échantillon. Les portions de la couche métallique situées sur la résine sont décollées (d'où le nom du lift-off) lorsque l'échantillon est immergé dans un liquide capable de dissoudre la photorésine sous-jacente. La résine agit donc comme une couche pochoir (stencil layer) en permettant de déposer les motifs de platine désirés dans ses ouvertures et en retirant les portions situées sur elle.

La figure C.2 illustre les étapes pour la définition d'un motif métallique déposé par pulvérisation et mise en forme suivant la technique du lift-off. Une étape de photolithographie, expliquée de façon détaillée dans la section suivante, est effectuée pour mettre en forme la photorésine qui est dissoute dans les régions où se situeront les motifs du métal (étapes 1 à 4). La pulvérisation (étape 5) dépose la couche métallique (ou de céramique) sur toute la surface de l'échantillon. La dissolution de la couche de résine en utilisant un solvant tel que l'acétone, permet de retirer les parties non désirées de la couche mince (étape 6). Il est important que l'épaisseur de la couche de résine soit supérieure à l'épaisseur du film métallique tel qu'illustré à l'étape 5 de la figure C.2. De cette façon, la portion de la couche métallique déposée sur la résine se sépare distinctement de celle déposée dans la région exposée du substrat. De plus, cette

séparation permet au solvant d'atteindre plus facilement la couche de résine et de décoller la portion métallique située au-dessus.

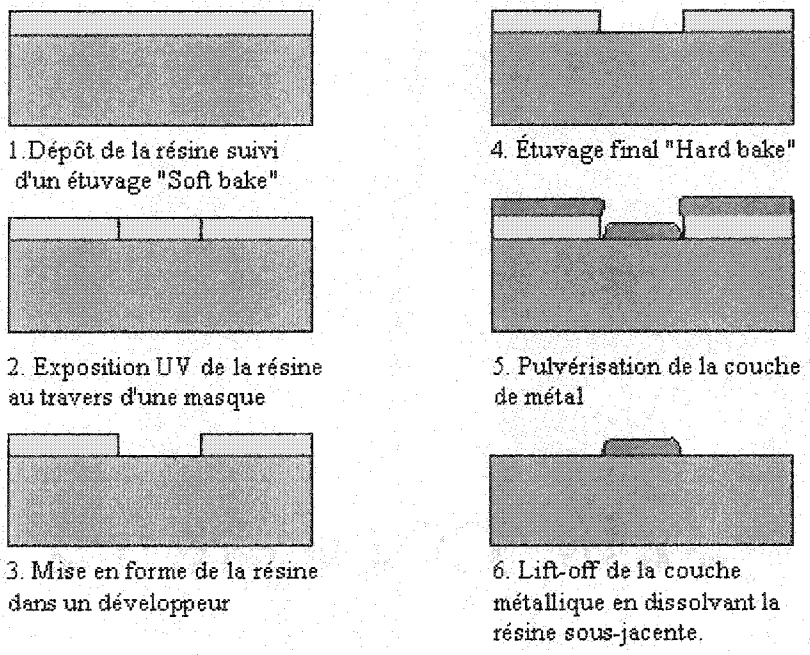


Figure C.2: Étapes de définition d'un motif métallique déposé par pulvérisation et mise en forme par lift-off.

C.2 Gravure anisotrope du silicium au TMAH

L'hydroxyde de tétraméthylammonium (TMAH) est une base forte organique, de formule chimique $(CH_3)_4NOH$ permettant la gravure anisotrope en milieu liquide du silicium monocristallin. Une solution de TMAH (ou TMAHW pour water) est caractérisée par son pourcentage en poids dans l'eau. Pour le micro-usinage du Si, on utilise des solutions de TMAH de concentration comprise entre 2 et 40% wt. (weight) à des températures comprises entre 70° et 90°C [6,103]. Les réactifs et les produits de réaction du TMAH avec le silicium sont présentés dans le tableau C.1:

Tableau C.1: Réactifs et produits de la réaction du TMAH avec le Si.

Réactifs du procédé	Produits de la réaction
Si - silicium	H_2 - hydrogène
H_2O - eau	$Si(OH)_4$ - silicates
OH^- - hydroxyde	

Par rapport aux différentes solutions de gravure anisotrope (voir chapitre 1), le TMAH présente les avantages d'être peu toxique, plus sécuritaire dans sa manipulation que l'EDP, compatible avec les procédés CMOS contrairement au KOH (qui constitue une source de contamination pour les oxydes de grille dans les circuits MOS) et de relativement faible coût. Le TMAH permet de graver de façon anisotrope les différents plans cristallins du silicium avec des taux de gravure différents [104]. Cette propriété permet de sous-graver des structures MEMS sans utiliser de gravure à partir de l'endos de l'échantillon [105]. Tel qu'illustré sur la figure C.3, les plans {111} interceptent avec un angle de 54.7° la surface d'un substrat (100) caractérisé par un méplat dans la direction <110>.

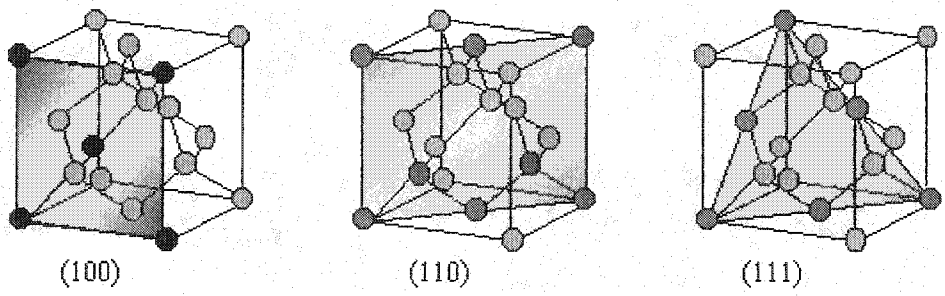


Figure C.3: Plans cristallins du silicium (100), (110) et (111).

La figure C.4 illustre la forme des cavités micro-usinées obtenues suivant la forme des ouvertures et leur alignement par rapport à la direction <110>. Ainsi, lorsqu'une ouverture rectangulaire dans un masque (composé d'un matériau non attaqué par le TMAH) est alignée suivant la direction du méplat (i.e. parallèle ou perpendiculaire à la direction <110>), les plans {111} qui sont très lentement gravés au TMAH vont apparaître dans la cavité micro-usinée et former une pyramide inversée tronquée au cours de la gravure (figure C.4-a). Si les bords de l'ouverture rectangulaire sont parfaitement alignés avec les directions <110>, peu de sous-gravure sera constatée en dessous du masque. Par contre, un mauvais alignement du masque résulte en une sous-gravure plus importante sous les bords du masque tel qu'illustré à la figure C.4-b. La figure C.4-c montre que, indépendamment de la géométrie de l'ouverture et de son alignement par rapport à la direction du méplat, une longue gravure au TMAH se terminera lors de la rencontre des plans {111} donnant à la cavité la forme d'une pyramide inversée. Le rapport de sélectivité entre les plans (100) et (111) est compris entre 10 et 35 pour une concentration de TMAH comprise entre 10 et 40 wt% [6].

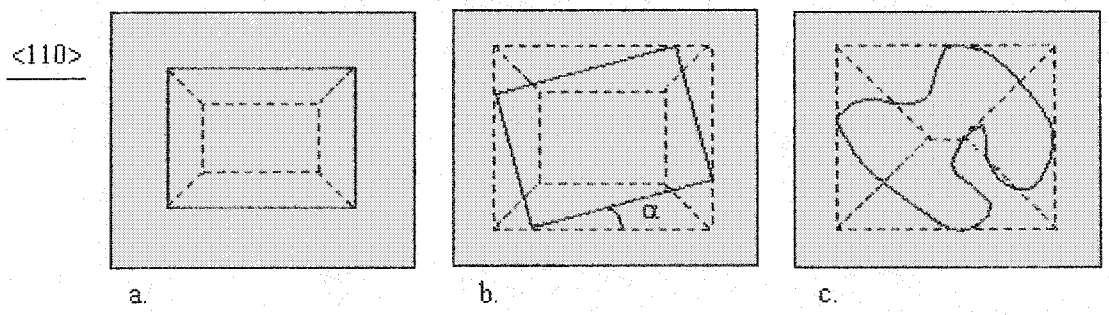


Figure C.4: Cavités micro-usinées dans le silicium suivant la forme de l'ouverture dans le masque et son alignement par rapport à la direction du méplat.

Par ailleurs, le TMAH présente la propriété de graver sélectivement (plus ou moins rapidement) différents matériaux. Ainsi, l'aluminium est gravé beaucoup plus rapidement que le silicium avec un taux de gravure supérieur à 200 µm/hr [23]. Tandis que le nitrure de silicium et l'oxyde de silicium sont gravés très lentement avec des taux de gravure typiques de 0,05 à 0,25 nm/min [6]. Ces derniers peuvent donc servir de masques ou bien de couches protectrices pour des matériaux qui se font rapidement graver dans le TMAH. D'autre part, une couche de silicium dopée bore à une concentration supérieure à 10^{19} cm^{-3} peut également être utilisée pour ralentir

ou arrêter complètement la gravure au TMAH [106]. Afin d'augmenter la sélectivité de gravure du silicium par rapport à l'aluminium (souvent exposé au niveau des pads de contact), du silicium dissout [107], des acides $(NH_4)_2CO_2$ ou $(NH_4)HPO_4$ [108], peuvent être ajoutés à la solution de TMAH. En effet, ces additifs permettent de diminuer le pH de la solution et de passiver la couche d'aluminium. L'addition combinée de péroxydisulfate d'ammonium $(NH_4)_2S_2O_8$ et de silicium dissout peut également être utilisée pour réduire le taux de gravure de l'Al en améliorant la rugosité de surface du silicium [109].

C.3 Gravure isotrope du silicium au XeF_2

Le difluorure de xénon (XeF_2) apparaît sous la forme d'une poudre cristalline blanche dans les conditions normales de température et de pression. Le XeF_2 réagit instantanément avec l'eau pour former de l'HF qui est toxique. Avec une pression de sublimation de 4 Torr (600 Pa) à la température ambiante, le XeF_2 peut être utilisé en phase gazeuse pour graver de façon isotrope le silicium. Le processus de gravure consiste essentiellement en quatre étapes: 1) l'adsorption du XeF_2 à la surface du silicium 2) la dissociation du XeF_2 qui permet de libérer du fluor, 3) la réaction du fluor avec le silicium pour former du SiF_4 adsorbé et 4) la désorption du produit SiF_4 dans le xénon résiduel. Par conséquent, la réaction chimique exothermique s'effectue suivant l'équation générale [100]:

$$2\ XeF_2 + Si \rightarrow 2\ Xe + SiF_4$$

où seul le silicium est en phase solide. L'utilisation du gaz de XeF_2 ne requiert donc pas de plasma pour générer les espèces chimiques réactives, ce qui simplifie le procédé.

La gravure au XeF_2 offre les avantages majeurs d'un taux de gravure élevé (supérieur à 1μm/min) [110] et d'une très grande sélectivité vis à vis de plusieurs matériaux tels que l'aluminium, l'or, le nitrure de titane, le chrome, l'oxyde de silicium (thermique, PSG, BPSG), le nitrure de silicium et la photorésine [6,100]. Bien que la surface de silicium obtenue après gravure soit rugueuse, la gravure au XeF_2 présente une bonne compatibilité avec un procédé CMOS.

C.4 Gravure plasma à ions réactifs

La gravure plasma à ions réactifs (RIE, reactive ion etching) est une technique de gravure sèche qui utilise une énergie externe sous la forme d'une puissance radio-fréquence (RF) pour créer un plasma dans une enceinte remplie d'un gaz inerte à des pressions de l'ordre de 1-100 mTorr. La décharge plasma est utilisée pour produire les espèces réactives qui vont réagir chimiquement avec le matériau à graver et former des produits de réaction volatiles. Le processus de gravure plasma RIE (à partir de CF_4) d'un substrat de Si est illustré à la figure C.5.

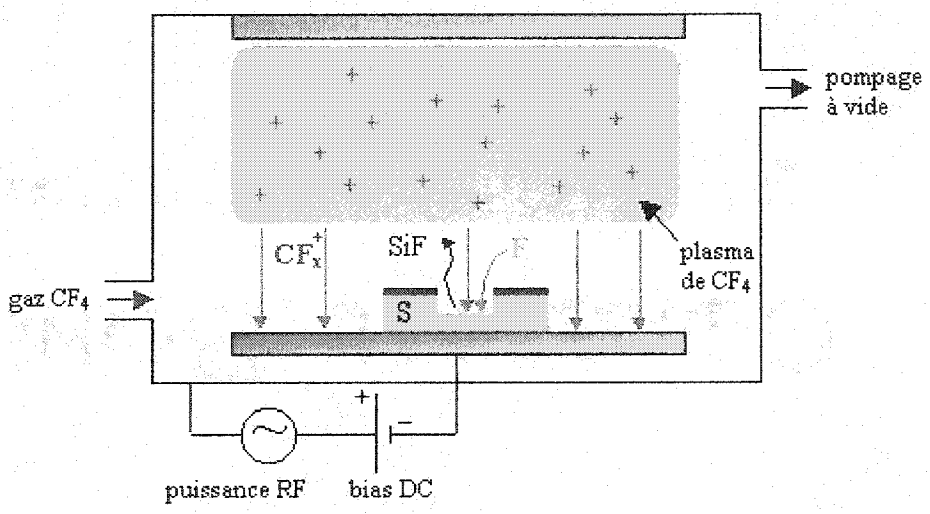


Figure C.5: Processus de gravure RIE d'un substrat de Si à l'aide d'un plasma de CF_4

Le processus de gravure par ions réactifs du substrat consiste essentiellement en 7 étapes [111]:

1) La génération de l'environnement gazeux permettant la gravure du substrat. L'application d'une puissance RF sur une paire d'électrodes planes permet d'accélérer des électrons qui vont entrer en collision avec des molécules du gaz inerte en formant, par dissociation/ionisation des ions, des électrons, des particules neutres et des espèces activées (radicaux *).
2) L'apparition d'une tension DC de polarisation négative (DC self bias voltage) après la génération de la décharge plasma de potentiel positif sur l'électrode où se trouve placé le substrat (due à une mobilité supérieure des électrons par rapport à celle des ions).
3) La diffusion des ions positifs de la décharge plasma vers le substrat. Ces ions, extraits du plasma, sont accélérés par le fort champ électrique régnant dans la région où le plasma est en contact avec le substrat (la gaine). Le bombardement physique ionique, dirigé

perpendiculaire à la surface du substrat selon la direction du champ électrique, permet d'initier une gravure anisotrope du substrat.

4) L'adsorption des espèces réactives (radicaux) sur la surface du substrat de Si assisté par le bombardement ionique qui crée des sites actifs (en retirant par exemple la couche de SiFx qui passiverait la surface du Si).
5) La réaction chimique entre les espèces adsorbées (radicaux F*) et le silicium entraînant la formation de produits de réaction volatiles tels que le SiF_4 ou ses précurseurs SiF_x ($x < 4$).
6) La désorption des produits de réaction volatiles de la surface du matériau gravé.
7) L'évacuation des espèces désorbées qui diffusent dans le volume de gaz évacué par le système de pompage.

La configuration capacitive du plasma RF permet donc de produire un bombardement d'ions énergétiques sur la surface à graver ainsi que des espèces réactives effectuant une gravure chimique du matériau. Dans les régions où il y a un faible bombardement, telles que les parois verticales des zones gravées, une couche de polymère fluorocarbonée (de quelques nanomètres d'épaisseur) se forme et retarde la gravure latérale du silicium. Il en résulte une augmentation de l'anisotropie de la gravure. Pour la gravure du silicium, de l'oxyde de silicium et d'autres matériaux VLSI, les gaz réactifs contenant du fluor sont les plus utilisés [6] tels que: $CClF_3$ (Freon^{TM} 13) + Cl_2, $CHCl_3$ + Cl_2, SF_6, NF_3, CCl_4, CF_4 (Freon^{TM} 14) + H_2 et C_2ClF_5 (Freon^{TM} 115). Cependant l'utilisation de chlorofluorocarbones (CFC) tend à être éliminée progressivement à cause de leurs effets néfastes sur la couche d'ozone de la haute atmosphère terrestre.

Prenons l'exemple de l'utilisation du CF_4 pour une gravure du Si. Dans la décharge plasma de CF_4, les espèces formées les plus abondantes sont CF_3^+ et F* qui sont obtenus suivant la réaction [13]:

$$e^- + CF_4 \rightarrow CF_3^+ + F + 2e^-$$

Les radicaux se trouvent dans un état de lien chimique incomplet (espèces excitées) qui les rend très réactifs et sont responsables de la plupart des gravures chimiques. Ainsi le radical F* réagit avec le Si pour former un produit volatile suivant la réaction:

$$Si + 4F^* \rightarrow SiF_4\,g\uparrow$$

ANNEXE D

DÉVELOPPEMENT DES PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES (POST-TRAITEMENT)

D.1 Procédure expérimentale pour la définition des motifs de Pt

La préparation initiale des échantillons consiste à nettoyer leur surface en les immergeant successivement dans des solutions chauffées d'acétone puis de propanol. Un bain de nettoyage par ultrasons peut également être employé pour augmenter l'efficacité du nettoyage. Un rinçage est effectué avec de l'eau dé-ionisée (DI) qui est ensuite chassée de la surface de l'échantillon par un flux d'azote. Les échantillons sont ensuite placés dans un four à 120 °C pendant 2 h au minimum pour s'assurer qu'ils soient parfaitement secs.

L'étape de photolithographie utilise une résine positive HPR-504 (OCG Microelectronic Materials) qui est étalée sur toute la surface de l'échantillon au moyen d'une tournette. Pendant 5 s, la vitesse de rotation de la tournette est augmentée lentement pour permettre à la résine de recouvrir de façon homogène toute la surface de l'échantillon. Puis la vitesse de rotation est accélérée rapidement à 3000 tours/min et maintenue pendant une durée de 30 s pour obtenir une épaisseur mesurée de 1,5 µm. L'échantillon recouvert de résine est ensuite placé pendant 1 min au centre d'un porte-substrat situé sur une plaque chauffante dont la température est réglée à 112°C. Un thermocouple, relié à un multimètre, est intégré au porte-substrat pour vérifier sa température. D'autre part, la configuration du porte-substrat, permet un contact étroit avec l'échantillon par succion au moyen d'un vide primaire. Cette étape de recuit pré-insolation, dite "pre-bake" ou "soft bake" permet l'évaporation des solvants contenus dans la résine. Au moyen

d'un aligneur de masques semi-automatique (Karl Süss MA4), illustrée à la figure D.1, la résine photosensible est exposée insolée par une lampe ultra-violet (365 nm) au travers d'un photomasque contenant les motifs de platine à déposer, placé en contact direct avec la photorésine et aligné avec le substrat. Ce photomasque est constitué d'une plaque en quartz transparent aux ultra-violets et de motifs composés d'une couche métallique absorbante en chrome (opaque à la lumière UV).

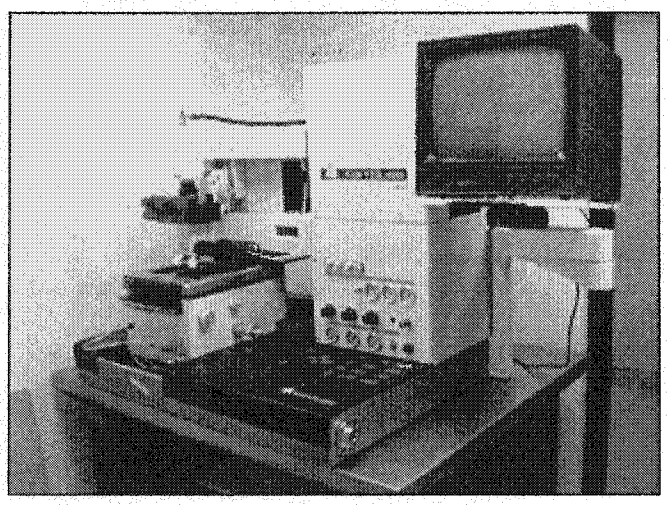


Figure D.1: Aligneur de masque utilisant une lampe UV à mercure de 350 W (longueur d'onde λ = 365 nm et une puissance d'insolation au niveau du substrat de 6 mW/cm^2).

Après l'exposition aux UV, l'échantillon est ensuite immergé dans le développeur HPRD 419 (OCG) pendant 1 min et 30 s afin de révéler les motifs du masque dans la résine. Une étape d'étuvage final dit "post-bake" ou "hard bake" est effectuée pour éviter le dégazage de la résine au cours de la pulvérisation. Initialement ce recuit était réalisé sur la plaque chauffante à 130 °C pendant 2 min. Cependant, cet étuvage pré-pulvérisation n'était pas suffisant puisqu'un dégagement de solvants de la résine, se traduisant par des boursouflures dans la couche mince de Pt, a été observé. Le durcissement de la résine est donc effectué, soit en plaçant l'échantillon dans un four à convection à 110 °C pendant 30 min ou soit dans un système de nettoyage à ozone/ultra-violets (UVOCS) permettant l'insolation aux UV de la résine pendant 10 min. Le tableau suivant résume les paramètres utilisés pour l'étape de photolithographie réalisée avant la pulvérisation en vue de la mise en forme de la couche mince de Pt par lift-off

Tableau D.1: Paramètres utilisés pour l'étape de photolithographie.

Procédure expérimentale pour la photolithographie UV	
a. Dépôt de la résine HPR 504	35 s à 3000 tr/min
b. Soft bake	112°C pendant 1 min
c. Exposition aux UV	66 mJ/cm^2
d. Développement de la résine	développeur PLS 419 pendant 90 s
e. Hard bake	Four à 110°C pendant 30 min ou insolation UV pendant 10 min

Le dépôt de la couche mince de platine est effectué par pulvérisation magnétron dans un bâti sphérique maintenu sous ultra vide (UHV, ultra-high vacuum) avec une pression de l'ordre de $5 \cdot 10^{-8}$ Torr au moyen d'une pompe cryogénique et d'une pompe turbo-moléculaire. Le pulvérisateur (voir figure D.2 et représentation schématique D.3) est muni de 6 magnétrons (cibles de 100 mm) et permet d'effectuer le dépôt d'une couche mince sur une gaufre de 100 mm de diamètre. Ce système multi-cibles, permet d'effectuer: une co-pulvérisation, une pulvérisation réactive, une rotation de l'échantillon pour l'uniformité de la couche mince déposée et aussi de contrôler l'épaisseur de la couche mince déposée au moyen d'un moniteur d'épaisseur.

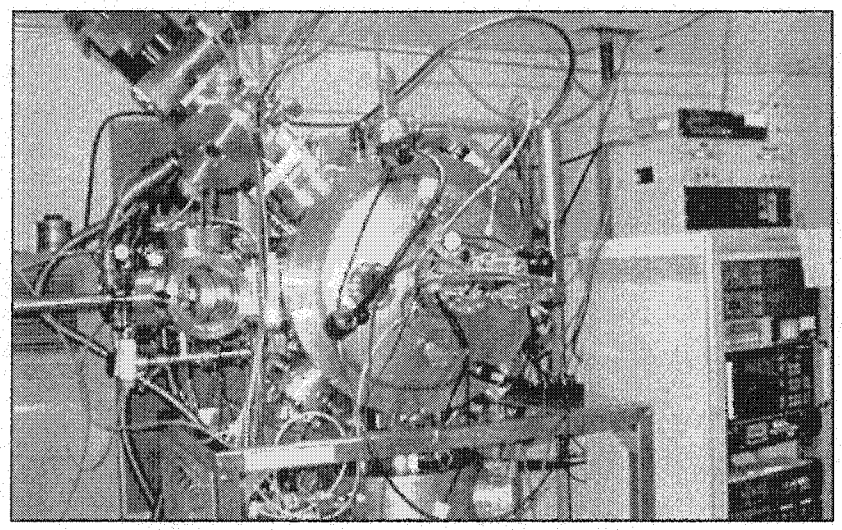


Figure D.2: Montage expérimental du pulvérisateur magnétron UHV.

La procédure expérimentale pour la pulvérisation débute en vérifiant que le système de refroidissement des magnétrons est en fonction. Un flux d'azote (N_2) est envoyé dans le sas d'entrée pour le ramener à la pression atmosphérique et permettre son ouverture. L'échantillon, collé sur le porte-substrat (avec du papier collant de type Kapton) est introduit dans un sas d'entrée et fixé sur un bras manipulateur qui permettra son transfert dans la chambre UHV. Au moyen d'une pompe mécanique, on effectue un vide primaire à 10^{-2} Torr. Puis une pompe turbo-moléculaire permet d'abaisser la pression dans le sas d'entrée descende en dessous de $5 \cdot 10^{-6}$ Torr obtenu au bout d'une heure de pompage. L'ouverture d'une vanne à tiroir permet de mettre en communication le sas d'entrée avec la chambre à ultra-haut vide. Le bras manipulateur est déplacé lentement de manière à transférer l'échantillon dans la chambre à ultra-haut vide. Au moyen d'une baïonnette, le porte-substrat est accroché sur son support au centre de la chambre. Le porte-substrat est disposé sur un support qui est inclinable de manière à placer l'échantillon face à n'importe laquelle des 6 cibles. Avant d'effectuer la pulvérisation, l'échantillon est orienté à 90° de celle-ci pour permettre d'allumer le plasma sans débuter la pulvérisation de la cible. Le bras de transfert est ensuite retiré de la chambre à haut vide et la vanne tiroir est refermée pour isoler la chambre du sas d'entrée. Le vide de base dans la chambre de pulvérisation descend en dessous de $2 \cdot 10^{-7}$ Torr au bout d'une heure de pompage. Ce vide est nécessaire pour éviter la contamination par l'eau, l'oxygène et les hydrocarbures.

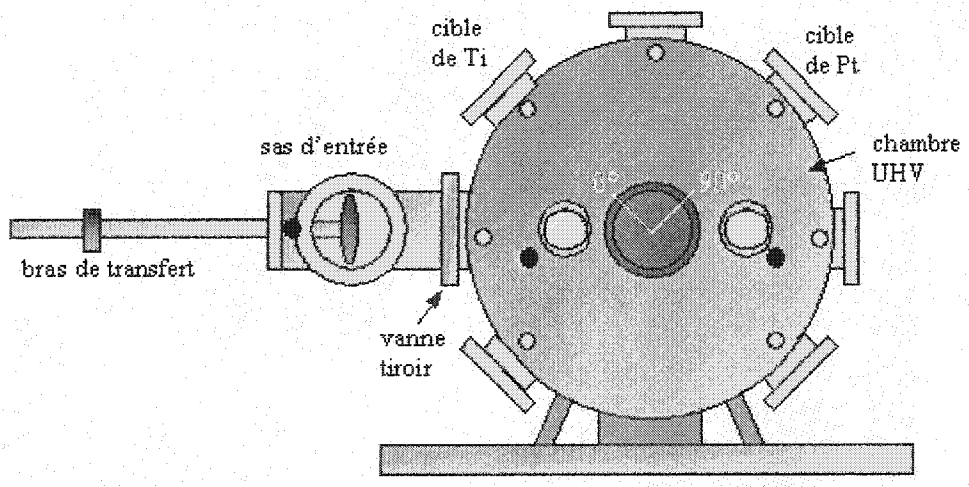


Figure D.3: Vue schématique du pulvérisateur magnétron

Au cours de la pulvérisation, seule la pompe cryogénique est utilisée pour contrôle la pression dans la chambre. Un flux d'argon de 10 sccm est introduit dans la chambre où la pression est fixée à 10 mTorr au moyen d'un contrôleur de pression. Une source d'alimentation RF permet de créer un plasma d'argon. La puissance incidente est ensuite augmentée lentement jusqu'à 300 W, tandis qu'un contrôleur d'adaptation d'impédance RF (matching network) permet d'ajuster la puissance réfléchie à 0 W. Pour permettre au platine de mieux adhérer sur la surface de l'échantillon, une fine couche de titane (Ti) est déposée auparavant par pulvérisation. Ainsi, lorsque la puissance est stabilisée, le porte-échantillon initialement positionné à 90° de la cible de Ti est orienté de manière à se retrouver en face de la cible dont le cache a été déplacé pour permettre son bombardement. Après une durée chronométrée de 30 sec de dépôt de Ti, la puissance du générateur RF est rapidement remise à zéro pour arrêter la pulvérisation. L'épaisseur de la couche d'adhérence de Ti est nominalement de 100 Å. Ensuite, une procédure identique est appliquée pour la pulvérisation de la cible de Pt qui était protégée par un cache lors du dépôt de Ti. Le dépôt de platine est réalisé pendant une durée de 4 min de manière à avoir une épaisseur de l'ordre de 2000 Å. La figure D.4 montre le plasma d'argon lors de la pulvérisation du Ti et du Pt. Les champs magnétiques élevés, générés par les magnétrons, augmentent le nombre de collisions ioniques près de la surface de la cible qui apparaît très lumineuse.

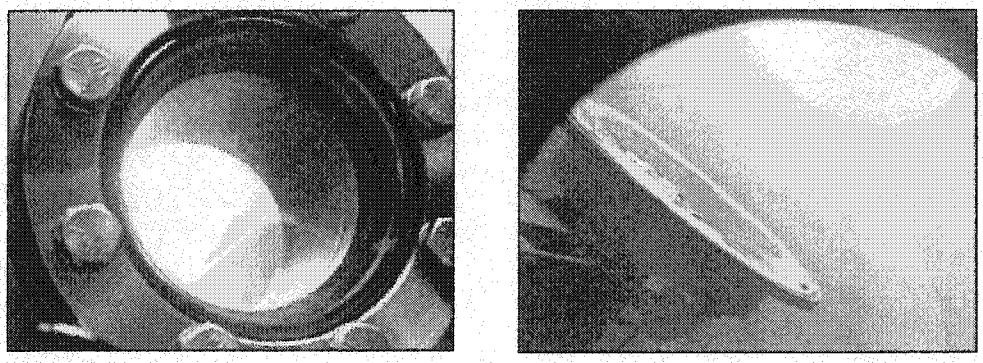


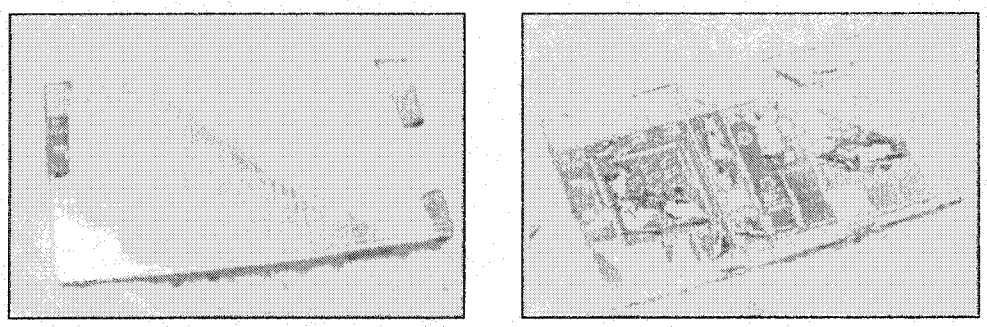
Figure D.4: Observation du plasma d'argon confiné au niveau des cibles de Ti (a) et de Pt (b) durant le dépôt d'une couche de Ti/Pt sur la surface d'une quart de gaufre.

Le tableau suivant résume les conditions utilisées pour le dépôt de Ti/Pt à l'aide du pulvérisateur magnétron du laboratoire LISA.

Tableau D.2: Paramètres utilisés pour le dépôt de Ti/Pt par pulvérisation magnétron.

Conditions expérimentales pour la pulvérisation de Ti/Pt	
vide de base du pulvérisateur avant dépôt	$< 5 \cdot 10^{-7}$ Torr
flux d'argon (Ar) de pureté ultra haute	10 sccm
pression dans la chambre avec le gaz Ar	10 mTorr
puissance RF incidente	300 W
taille des cibles	100 mm (4 po)
épaisseur déposée de Ti (couche d'adhérence)	100 Å
épaisseur déposée de Pt	2000 Å

La figure D.5 montre un échantillon (design ICBPMAT5) recouverts par une couche mince de Ti/Pt (a) puis introduit dans de l'acétone pour le lift-off du platine qui peut prendre de 1 à 2 h (b). De petits jets d'acétone au moyen d'une pissette aident à décoller plus rapidement les morceaux de platine de la surface.



a. b.

Figure D.5: Décollement de la couche mince de platine dans les régions non désirées suivant la technique du lift-off: a) après le dépôt du Pt et b) au cours du lift-off.

D.2 Procédure de dépôt et de mise en forme d'une résine négative

Pour certaines séries de fabrication, la couche de passivation au niveau des pads de contact montrait des faiblesses. Une étape de dépôt de résine négative a été ajoutée après le dépôt de platine et avant la gravure au TMAH afin d'apporter une protection supplémentaire aux pads de contact. La résine négative employée est la HNR 120 (Arch Chemicals), déposée sur la surface de l'échantillon au moyen d'une tournette avec une vitesse de rotation de 3000 tr/min pendant 35 sec. Un "soft bake" de 6 min est réalisé à 90°C suivi d'une exposition aux UV. La résine négative est ensuite développée dans le développeur WNRD (Waycoat Negative Resist Developer) pendant 1 min puis l'échantillon est rincé dans de l'eau DI. Un "hard bake" de 6 min à 145 °C complète le dépôt de la résine.

D.3 Procédure expérimentale pour la gravure au TMAH

Le montage pour la gravure au TMAH, est représenté schématiquement à la figure D.6 et illustré sur la figure D.7. La procédure expérimentale débute par l'introduction d'une solution de TMAH à 25% wt dans un bêcher en silice qui est ensuite refermé de façon hermétique à l'aide d'une cloche creuse permettant une circulation d'eau froide. Ce couvercle permet de condenser les vapeurs de TMAH et de maintenir ainsi sa concentration dans l'eau pendant la gravure. Le bêcher est ensuite placé au centre d'un bain thermostaté rempli d'eau chaude et recouvert d'une plaque de téflon. Le chauffage de l'eau par le bain thermostaté seul peut prendre jusqu'à 5 h pour atteindre la température désirée comprise entre 80 et 90°C. De ce fait, la température de l'eau est préalablement chauffée au moyen d'une bouilloire électrique avant d'être introduite dans le bain thermostaté. Le niveau d'eau chaude doit dépasser le niveau de TMAH contenu dans le bêcher afin d'assurer une température uniforme dans la solution.

Un thermocouple, relié à un convertisseur tension-température et à un voltmètre, permet de mesurer la température réelle de la solution de TMAH. Après 45 min, la solution de TMAH atteint une température de l'ordre de 85°C pour une température dans le bain d'environ 89°C. Les échantillons, placés sur des portes-échantillons en téflon, sont introduit dans la solution de TMAH en déplaçant brièvement et de façon sécuritaire la cloche en verre au-dessus du bêcher. Pour arrêter la gravure, les échantillons retirés de la solution sont rapidement immergés dans des bêchers en téflon rempli d'eau DI. Un flux d'azote permet de retirer l'eau de la surface de

l'échantillon qui est par la suite séché à 100°C dans un four à convection. La solution de TMAH 25% wt. chauffée à une température de 85°C permet de graver le silicium avec un taux de gravure de 30 µm/hr (obtenu à partir d'une mesure au profilomètre Dektak de la profondeur de cavités micro-usinées).

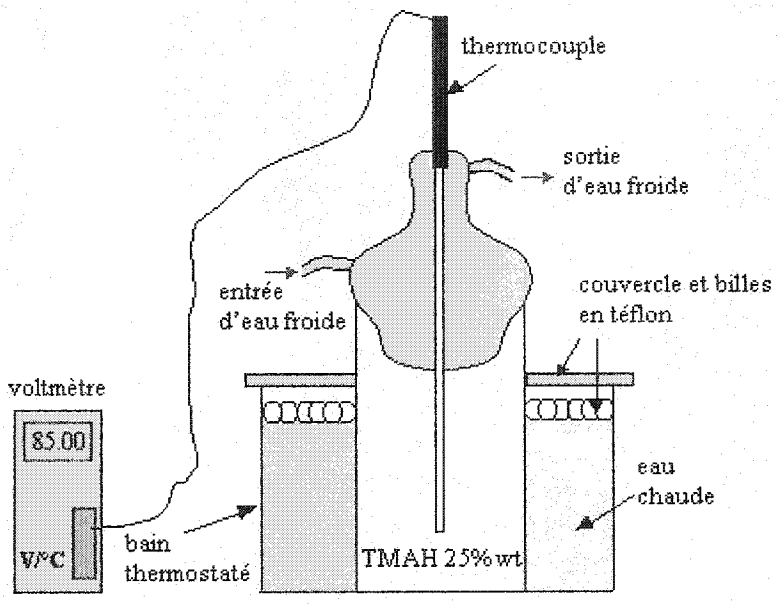


Figure D.6: Schéma du montage de gravure au TMAH

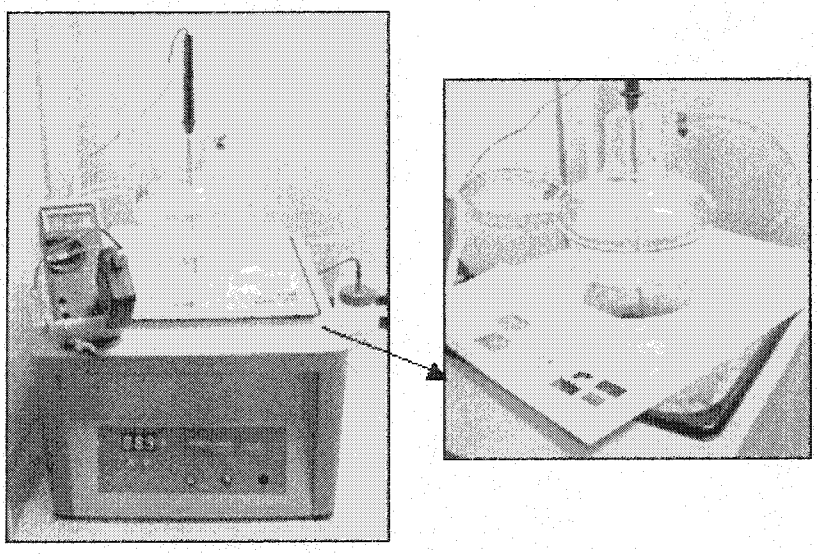


Figure D.7: Montage expérimental pour la gravure anisotrope au TMAH.

D.4 Optimisation de l'étape de gravure au TMAH

Le montage initial utilisait simplement une plaque chauffante sur laquelle était placé le bêcher contenant la solution de TMAH. L'inconvénient de ce montage était l'instabilité de la température de cette solution (pouvant varier jusqu'à 4°C) En effet, des ajustements toutes les 5-10 min étaient nécessaires pour modifier la température de la plaque chauffante et obtenir une température moyenne de 90°C pour la solution de TMAH. Les pertes de chaleur ont principalement lieu au niveau des parois du bêcher. Une protection métallique de forme cylindrique, disposée autour du bêcher aide à réduire les pertes de chaleur au niveau des parois mais, elle ne permet pas de stabiliser la température. L'utilisation d'un agitateur magnétique inséré dans le bêcher et dont la rotation est contrôlée au niveau de la plaque chauffante permet un chauffage plus rapide et uniforme de la solution de TMAH. Cependant, l'inconvénient majeur de cette technique lors d'une gravure concerne les bris causés au niveau des structures en porte-à-faux. En effet, la circulation de liquide créé par l'agitateur est trop violente et brise la plupart des structures libérées.

Le montage a été optimisé en contrôlant la température de la solution de TMAH au moyen d'un bain d'eau muni d'un thermostat. En effet, le bêcher est immergé de manière à ce que l'eau du bain thermostatique dépasse approximativement de 1,5 cm le niveau de TMAH. De cette façon, il n'y a plus de pertes de chaleur au niveau des parois du bêcher. Au contraire, la solution de TMAH est chauffée de manière uniforme sans utiliser d'agitateur magnétique. D'autre part, pour éviter des pertes de chaleur au niveau de la surface de l'eau du bain thermostatique, un couvercle en téflon de 2,5 cm d'épaisseur est fixé au moyen de vis sur le bain thermostatique. Une ouverture circulaire au centre de la plaque de téflon permet de placer le bêcher de TMAH dans le bain thermostatique en conservant à l'extérieur la cloche de verre où s'effectue la circulation d'eau froide. En minimisant ainsi les pertes de chaleur, le thermocouple inséré en permanence dans la solution de TMAH montre que la température de gravure reste stable pendant toute la durée de l'expérience. Des billes en plastique, remplies d'air et disposées sur toute la surface de l'eau du bain, peuvent également être ajoutées pour limiter les pertes thermiques (et améliorer la stabilité de la température de l'eau).

Au début de ce projet, les échantillons étaient reçus sous forme de dés de 3 mm par 3 mm. Ces échantillons demandent beaucoup de précaution et de précision lors de leur manipulation. Du fait de leur surface carrée, la présence de coins convexes entraîne l'apparition de plans cristallins ayant un taux de gravure élevé. Ainsi les échantillons réduisent considérablement en taille et il devient extrêmement difficile de les récupérer avec des pinces dans la solution de TMAH. La figure D.8 montre que ces plans à taux de gravure élevés sont à l'origine des cassures des coins du dé et que cela peut également endommager les lignes métalliques du "padframe". Plusieurs porte-échantillons en téflon ont été usinés afin de protéger les dés durant la gravure. Le design du porte-échantillon ayant donné les meilleurs résultats consiste en une cavité carrée usinée dans un morceau de téflon et recouverte d'un masque fixé avec des vis également en téflon. Le masque est dessiné de manière à recouvrir tout le contour du dé et protège ainsi le "padframe" du TMAH. Les coins convexes du dé sont ainsi protégés ce qui permet de récupérer, à la fin d'une gravure, un échantillon ayant conservé ses dimensions initiales. Après retrait du porte-échantillon de la solution de TMAH, l'échantillon est immergé dans un bêcher contenant de l'eau D.I. afin d'arrêter la gravure. Le masque est ensuite retiré avec précaution de manière à ne pas endommager pas la surface de l'échantillon. Par la suite, l'échantillon est séché à température ambiante puis dans un four à 100°C pendant au minimum 1h.

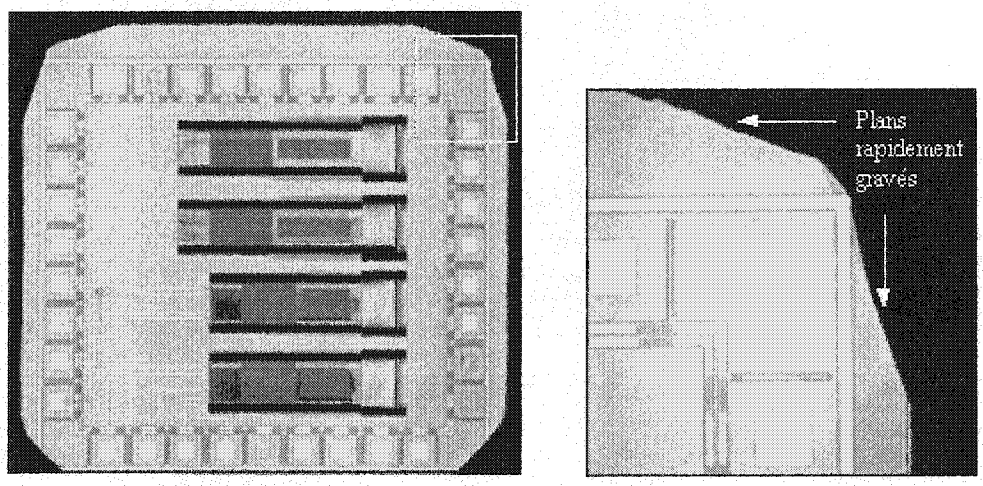


Figure D.8: Micrographie optique du design ICBPMET3 après une gravure au TMAH 25% wt. à 90°C de 2 h a) vue générale du dé gravé aux coins convexes b) agrandissement d'un coin convexe brisé.

Pour que l'échantillon sèche plus rapidement et éviter que de l'eau ne reste sous les structures en porte-à-faux libérées, une immersion dans un solvant tel que l'acétone permet d'éviter l'effet de succion qui pourrait coller l'extrémité de la poutre au fond de la cavité. Cependant, dans le cas des structures en porte-à-faux conçues pour ce projet, ce problème n'a pas été rencontré. Suivant l'espace disponible, des soumissions pour des designs de plus grandes tailles (3 mm par 6 mm, et 6 mm par 6 mm) ont été acceptées. Ainsi, la surface du dernier design ICBPMAT5 a permis d'intégrer sur le même dé, le système d'adressage microélectronique et la matrice d'actuateurs. La figure D.9 permet de comparer les dimensions de ce dé à une pièce de monnaie canadienne de 10 cents. Comparativement au format standard des échantillons reçus, ces dés de plus grande taille sont plus aisés à manipuler.

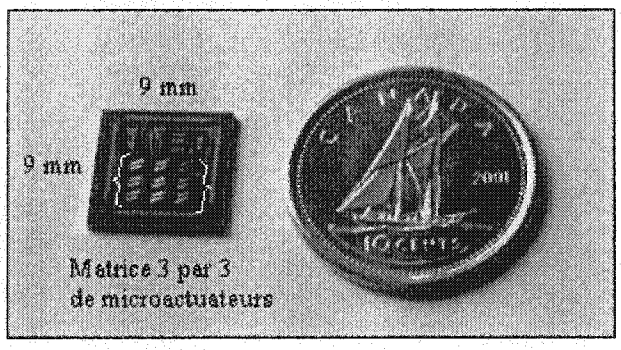


Figure D.9: Dé du design ICBPMAT5 d'une taille de 9 x 9 mm^2.

D.5 Procédure expérimentale pour la gravure au XeF_2

Les cristaux de XeF_2 sont envoyés par le fournisseur (Pelchem) encapsulés dans une bouteille de téflon sous atmosphère d'argon. Tel qu'illustré à la figure D.10, les cristaux de XeF_2 sont introduits dans un compartiment du montage de gravure au moyen d'une boite à gants étanche mise sous atmosphère d'argon. Cette procédure permet d'éviter que le XeF_2 ne réagisse avec l'humidité de l'air ambiant pour générer des vapeurs toxiques de HF. La procédure expérimentale débute avec la purge de l'ensemble du système avec un flux d'azote, chauffé à l'aide d'un ruban électrothermique disposé autour de la chambre à échantillon. Cette étape, d'une durée minimum comprise entre 20 et 30 min, permet d'éliminer les traces d'humidité à l'intérieur du système.

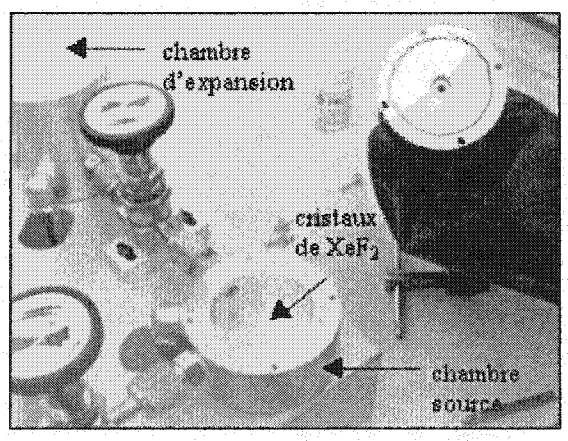


Figure D.10: Introduction des cristaux de XeF_2 dans la chambre source sous atmosphère d'argon.

Simultanément, les échantillons sont chauffés sur une plaque chauffante ou dans un four à convection, à 110°C pendant 10 min avant leur introduction dans la chambre de gravure pour s'assurer qu'ils soient parfaitement secs. En effet, le HF généré par réaction du XeF_2 avec l'humidité peut attaquer les couches d'oxyde de silicium en plus d'être toxique. La figure D.11 montre que la sélectivité du XeF_2 par rapport aux céramiques permet de graver des dés CMOS déjà montés et micro-soudés dans des boîtiers de type 40 DIP.

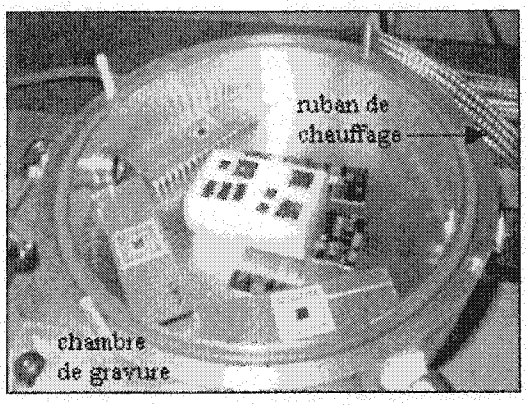


Figure D.11: Différents types d'échantillons dans la chambre de gravure au XeF_2.

L'introduction des échantillons est effectuée à l'air ambiant sous une hotte ventilée. Par conséquent, la chambre de gravure est à nouveau purgée en étant alternativement mise sous vide puis remplie d'argon pendant 5 min. Une représentation schématique du montage de gravure au XeF_2 est illustrée à la figure D.12.

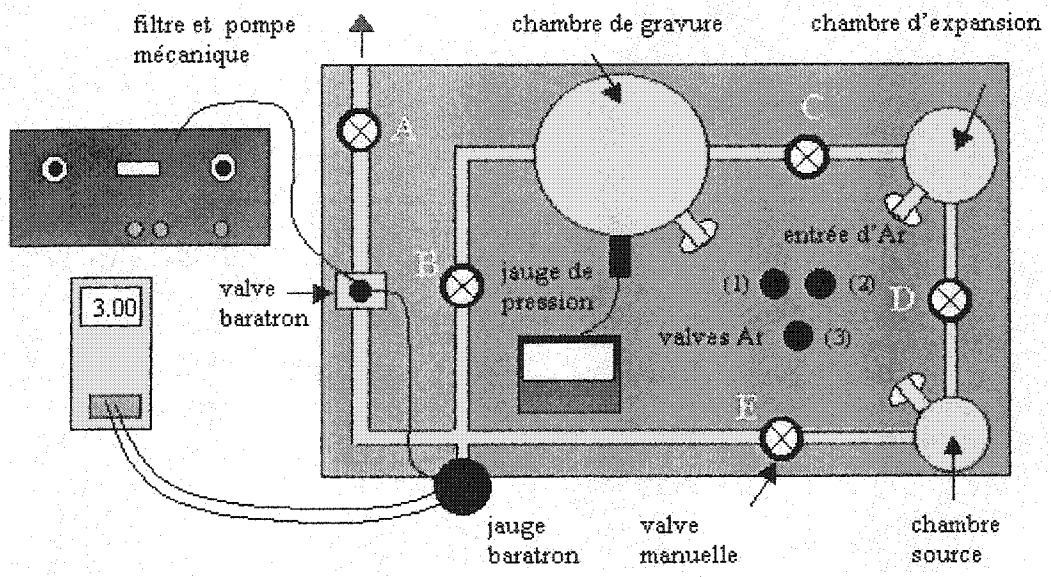


Figure D.12: Schéma du montage de gravure au XeF_2.

La valve A reliant le système à une pompe mécanique est toujours ouverte. Toutes les valves d'argon de (1) à (3) sont ouvertes pendant 2 min. Les valves B, C et E sont également ouvertes pendant 2 min pour purger toutes les chambres et les lignes métalliques. Le contrôleur de la jauge Baratron est mis en mode automatique pour obtenir une pression de 1 Torr. Puis toutes les valves d'Ar sont fermées pour permettre à la pression de descendre. Les valves E et B sont fermées lorsque la pression est descendue au-dessous de 4 Torr qui correspond à la pression à laquelle le XeF_2 passe de sa forme solide à sa phase gazeuse. Lorsque la pression dans le restant du montage est stabilisée à 1 Torr, la valve D est ouverte de manière à laisser circuler le XeF_2 vers la chambre d'expansion puis la chambre de gravure. Une méthode de gravure pulsée consiste à alterner des séquences de flux continu et de stagnation du XeF_2 gazeux au-dessus des échantillons, chacune d'elles durant environ une minute, en utilisant les valves B et C. La gravure du silicium a lieu à une pression comprise entre 1 et 4 Torr établie par un contrôleur de pression. Une vue du montage expérimental est présentée à la figure D.13.



Figure D.13: Montage expérimental pour la gravure isotrope au XeF_2.

Le taux de gravure du silicium typiquement obtenu est compris entre 1 et 1,2 µm/min. Aucune gravure mesurable n'a pu être constatée en ce qui concerne les couches minces du procédé CMOS telles que l'Al, le SiO_2, le Si_xN_y ainsi que la couche de Pt déposée en post-traitement.

D.6 Optimisation de l'étape de gravure au XeF_2

- **Le pré-traitement des échantillons**

Le retrait de l'oxyde natif avec une solution de $HF:H_2O$ (10:100) pendant 30 sec permet au XeF_2 d'attaquer plus rapidement le substrat de silicium. Mais étant donné que l'étape de gravure au XeF_2 est réalisée après la gravure au TMAH, ce pré-traitement n'est plus nécessaire. Par contre, un chauffage de l'échantillon sur une plaquette chauffante (hard-bake pendant 20 min dans un four à thermostat réglé à 100°C) peut améliorer les résultats de gravure en prévenant la présence d'humidité sur la surface de l'échantillon qui pourrait conduire à la formation de HF et donc attaquer les couches d'oxyde de la structure.

- **Le montage de gravure au XeF_2**

Le montage de gravure au XeF_2 doit être testé contre les fuites avant d'être utilisé pour prévenir l'introduction d'air ambiant et permettre le contrôle de la pression du gaz dans le montage. Par ailleurs, le montage expérimental nécessite l'utilisation d'une pompe mécanique de qualité permettant de réduire rapidement, la pression dans la chambre à échantillons à 0,1 Torr avant chaque entrée de gaz provenant de la chambre d'expansion à pression de l'ordre de 3 Torr. En effet, plus de gaz se forme dans la chambre, plus la pression augmente. Cependant la pression ne doit pas dépasser 4 Torr pour éviter que le gaz de XeF_2 retourne à son état solide sous forme de poudre. De plus, pour prévenir l'introduction d'humidité lors de l'introduction des échantillons dans la chambre de gravure, le montage expérimental (à l'exception de la chambre contenant la poudre de XeF_2) est purgé plusieurs fois à l'azote et chauffé en même temps (environ 20 min) au moyen d'une ceinture chauffante électrique.

- **Le produit XeF_2**

Compte tenu du coût du XeF_2, une faible quantité de produit est introduit dans la chambre source. Et bien que la chambre de gravure puisse contenir plusieurs échantillons de différentes tailles, sur boîtier ou non, un nombre faible d'échantillons est traités en même temps afin d'augmenter la concentration du produit par rapport au silicium à graver. D'autre part, il est très important de s'assurer de l'étanchéité du contenant de téflon contenant la poudre de XeF_2 sous atmosphère d'azote. En effet, des grains de XeF_2 qui sont entrés en contact avec l'humidité de l'air ambiant deviennent totalement inefficaces.

D.7 Procédure expérimentale pour la gravure RIE

La figure D.14 illustre le système de gravure RIE utilisé (Semi Group RIE system 1000 TP) composé de deux électrodes parallèles circulaires de 25,4 cm de diamètre (10 po) et séparées par une distance de 3,81 cm (1,5 po). La procédure expérimentale débute par l'ouverture des valves d'eau pour le système de refroidissement du RIE. En mode manuel, de l'azote est introduit dans la chambre pour permettre son ouverture à la pression atmosphérique afin de placer l'échantillon à graver au centre de l'électrode du bas. La chambre de gravure est à nouveau refermée tandis qu'une pompe mécanique permet d'établir un vide primaire en mode automatique. Les paramètres tels que le flux des gaz (10 sccm de CF_4) , la durée de la gravure et la pression de gaz dans la chambre de gravure sont enregistrés dans un programme. L'ouverture manuelle de la valve correspondant au gaz utilisé suivi du lancement du programme permet la réalisation automatique de la procédure de gravure RIE. Lorsque le vide dans la chambre atteint une pression de 215 mTorr, une pompe turbo-moléculaire permet d'effectuer un vide secondaire jusqu'à atteindre la pression désirée de 50 mTorr pour le CF_4. Une puissance incidente RF de 100 W permet de créer un plasma de CF_4 typiquement mauve. La polarisation du substrat obtenue (-135 V) permet aux cations générés dans le plasma d'être accélérés pratiquement à la verticale du substrat gravé. Le taux de gravure du substrat de silicium obtenu est de 350 Å/min pour un flux de CF_4 de 10 sccm, à une pression de 50 mTorr et une puissance de 100W.

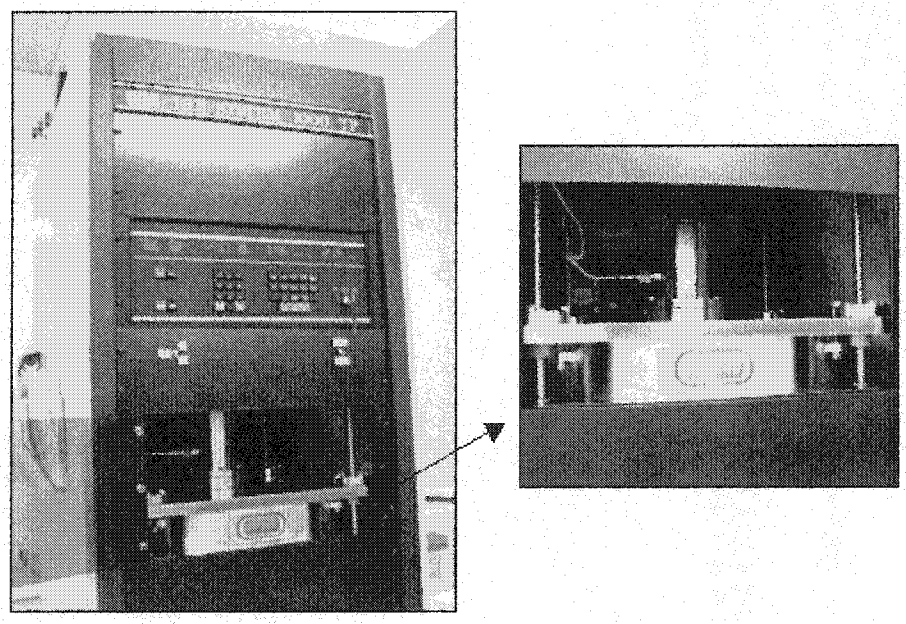


Figure D.14: Montage expérimental du RIE

ANNEXE E

MESURES PROFILOMÉTRIQUES SUR LES COUCHES MINCES DU PROCÉDÉ CMOS

E.1 Mesures profilométriques sur les couches minces CMOS

Les mesures effectuées sur ces carrés de couches minces au moyen d'un profilomètre Dektak sont présentées sur les figures E.1 pour les couches diélectriques et E.2 pour les couches métalliques et de polysilicium. Ces mesures sont comparées aux épaisseurs nominales lorsque les couches minces sont déposées [80].

La figure E.1-a qui correspond aux mesures sur chaque couche diélectrique montre que:

- la première couche d'oxyde thermique (ACT), ayant une épaisseur nominale de l'ordre de 0,9 µm, est situé à 0,2 µm en dessous de la surface du substrat. Or, la croissance d'un oxyde thermique d'épaisseur d, consomme une couche de silicium d'épaisseur $0{,}44d$ [1]. À partir de son épaisseur nominale, nous calculons que 0,4 µm d'oxyde doit se situer en dessous du niveau du substrat de silicium. Par conséquent, nous estimons l'épaisseur de la couche ACT restante de 0,2 µm. Cette couche a donc été gravée en grande partie lors des étapes de mise en forme des couches d'oxydes déposés dans la suite du procédé.
- les mesures effectuées au niveau des couches d'oxyde de contact (CON) et d'oxyde de via (VIA), toutes les deux d'une épaisseur nominale de 0,8 µm, donnent des épaisseurs effectives de 0,61 µm et 0,70 µm respectivement. Ceci démontre que la couche d'oxyde de contact est également gravée lors de la mise en forme des couches diélectriques suivantes. La couche d'oxyde de via ne subit pas les étapes de mise en forme des couches d'oxyde thermique et d'oxyde de contact, étant déposée plus tard dans le procédé. Par conséquent, la gravure de 12,5% de son épaisseur d'origine, suggère que la couche d'oxyde de via subit la gravure utilisée pour la couche de passivation.

- l'épaisseur mesurée de la couche de passivation, est de 1,52 µm, soit nettement supérieure à la valeur attendue de 1 µm. Ceci met en évidence le fait que le procédé a pu être modifié au cours des années.

La figure E.1-b présente les mesures effectuées sur les combinaisons de couches diélectriques du procédé. Ces mesures permettent de mettre en évidence les points suivants:

- la mesure de 0,78 µm profilométrique pour la combinaison de couches ACT-CON, correspond à l'épaisseur mesurée au dessus du niveau du substrat de silicium En tenant compte de l'épaisseur calculée de 0,4 µm d'oxyde thermique situé sous le niveau du substrat de silicium (correspondant à 44% de son épaisseur nominale), l'épaisseur estimée de la double couche ACT-CON est de ~ 1,2 µm. La couche d'oxyde thermique est ainsi protégée par la couche d'oxyde de contact, lors des étapes de gravure des couches d'oxyde de via et de la couche de passivation.
- la combinaison de couches ACT-CON-VIA est caractérisée par une mesure profilométrique de 1,72 µm par rapport au niveau du substrat de silicium; de la même façon, en tenant compte de l'épaisseur estimée de couche ACT, nous calculons que l'épaisseur de la triple couche ACT-CON-VIA est de ~ 2,1 µm. Ce résultat indique que les couches d'oxyde thermique et d'oxyde de contact sont protégées par la couche d'oxyde de via lors de la gravure de la couche de passivation.
- la quadruple couche ACT-CON-VIA-PAS est caractérisé par une mesure profilométrique de 4,41 µm où 1,52 µm correspond à l'épaisseur de la couche de passivation déposée. Ceci laisserait supposer que la triple couche ACT-CON-VIA serait de 3,3 µm d'épaisseur (en tenant compte de l'épaisseur de la couche ACT sous le niveau du substrat). Cette valeur est nettement supérieure à la valeur déterminée sur le carré correspondant à cette triple couche de 2,1 µm et à l'épaisseur totale attendue de 2,5 µm selon les informations obtenues sur le procédé. Ceci démontre que la couche d'oxyde de VIA est protégée par la couche de passivation lors de la mise en forme de cette dernière.

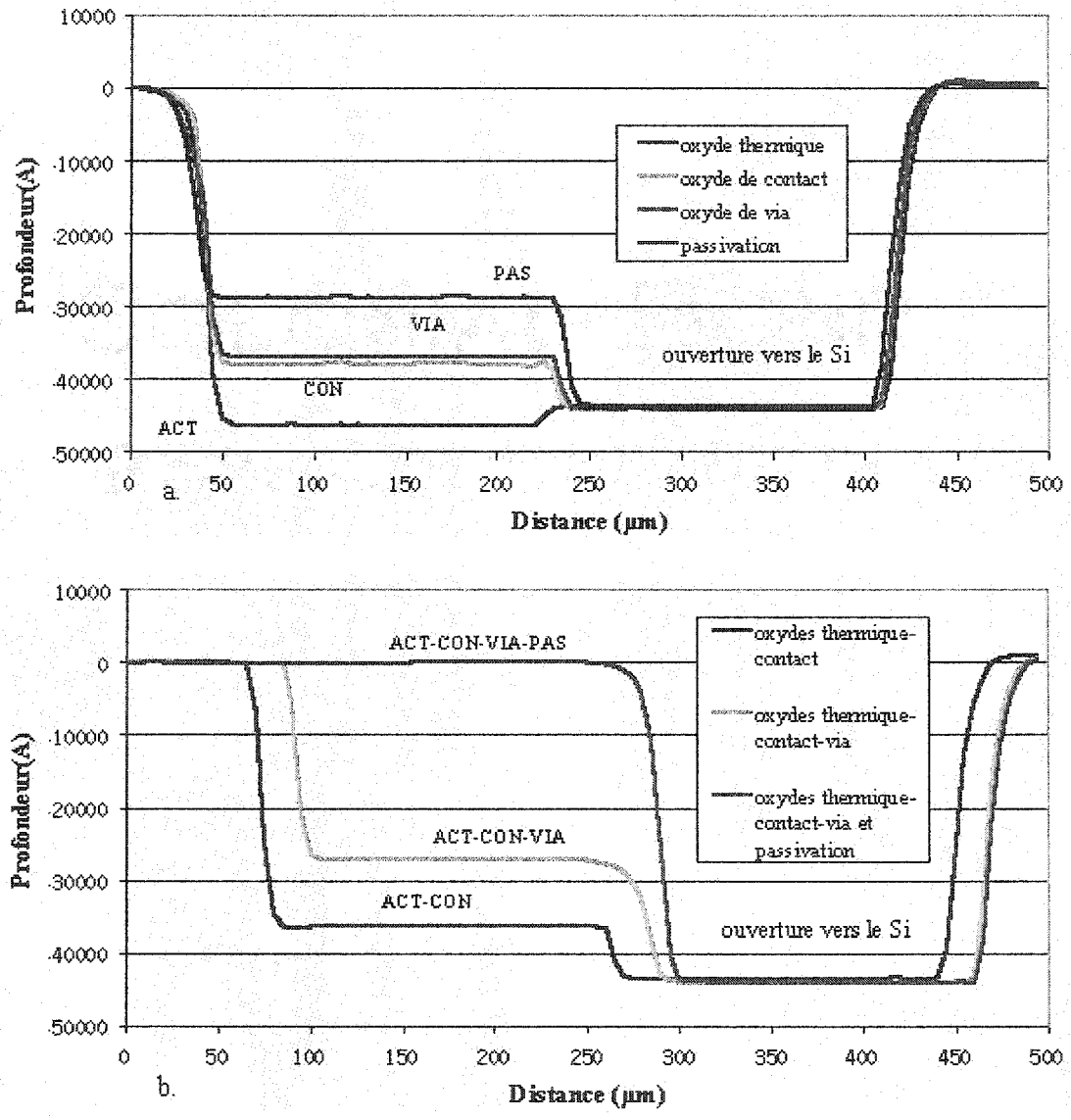


Figure E.1: Mesures au profilomètre Dektak sur les carrées de couches minces diélectriques du design ICBPMAT5: a) couches d'oxydes séparément et b) combinaison de ces couches diélectriques.

La figure E.2-a, présentant les mesures au profilomètre Dektak des épaisseurs de la première couche de polysilicium (P1) et des deux couches métalliques (M1 et M2), montre que:

- l'épaisseur de la couche P1 de 0,41 µm est supérieure à la valeur attendue de 0,3 µm. Lorsque la seconde couche de poly-silicium (P2) est déposée, elle est séparée de la couche P1 par un oxyde de 50 nm d'épaisseur. Par conséquent, la couche P1 ne devrait pas être affectée par la gravure de la couche P2.
- les épaisseurs mesurées des couches métalliques M1 et M2 respectivement de 1 µm et de 1,24 µm sont supérieures à l'épaisseur attendue de 0,8 µm. Comme dans le cas précédent de la couche de passivation, ces différences peuvent être dues à des changements dans le procédé d'une série de fabrication à une autre. Ces couches M1 et M2 devraient avoir la même épaisseur. Du fait de l'absence de la couche d'oxyde de via, la couche M1 a très probablement été gravée lors de l'étape de mise en forme de la couche M2.

La figure E.2-b montre les résultats des mesures réalisées sur des combinaisons de couches P1, M1 et M2 et permettent de mettre en évidence que:

- l'épaisseur de la double couche P1-M1 de 1,38 µm correspond sensiblement à l'addition des épaisseurs mesurées pour chacune de ces couches (en tenant compte d'une incertitude sur les mesures au profilomètre de ± 0,05 µm).
- la triple couche P1-M1-M2 de 3,06 µm d'épaisseur, montre que la couche M1 ne s'est pas fait graver lors de la mise en forme de la couche M2, étant protégée par celle-ci. Compte tenu de l'épaisseur mesurée de la couche P1, les couches M1 et M2 auraient une épaisseur moyenne de 1,3 µm, supérieure à l'épaisseur attendue de 0,8 µm.

Mentionnons que les carrés comportant les couches M1 et M2 ont été dessinés avec des dimensions légèrement supérieures aux carrés de couches diélectriques, ce qui explique la présence de "pics" sur la partie supérieure gauche des courbes profilométriques.

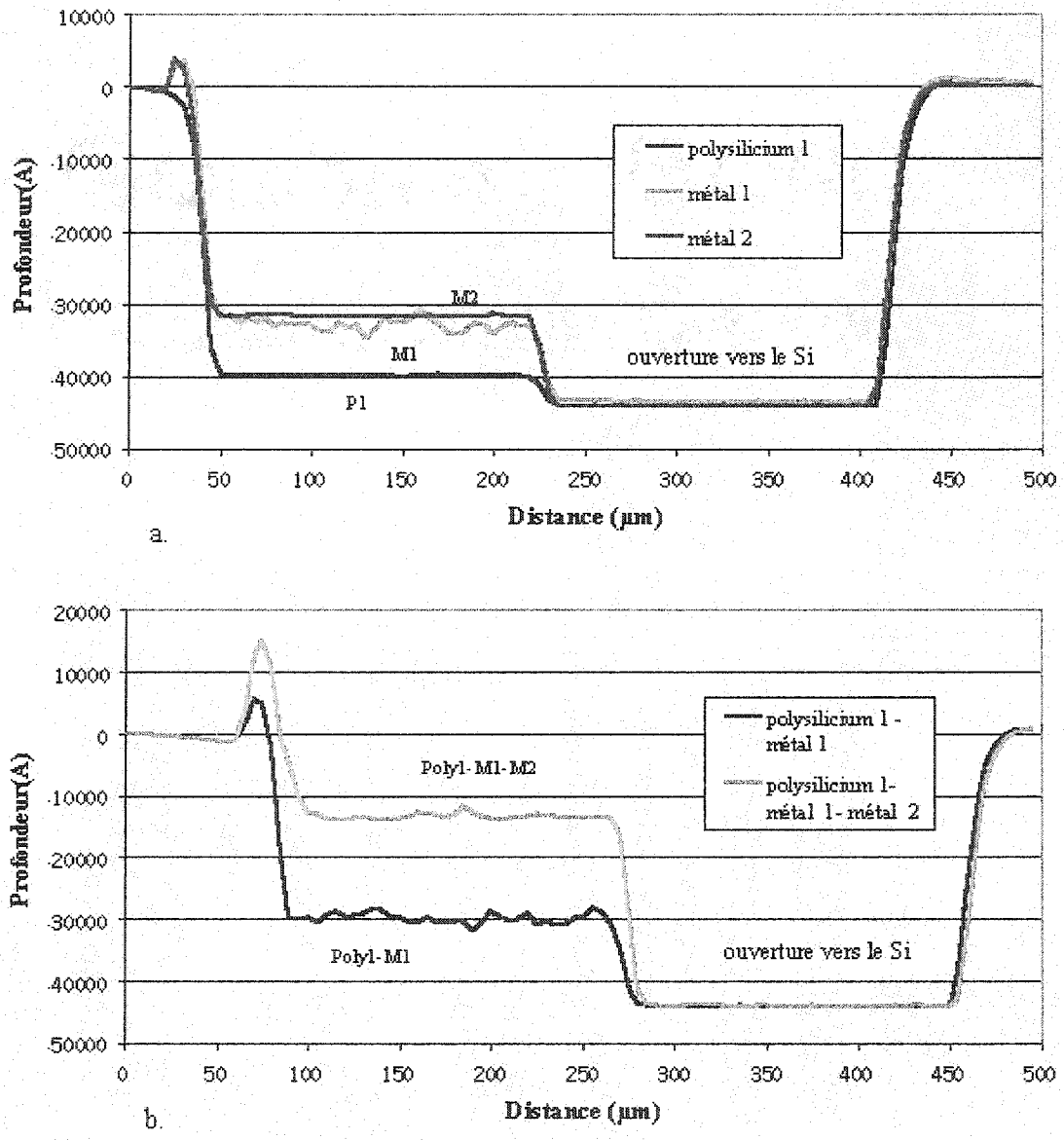


Figure E.2: Mesures au profilomètre Dektak sur les carrées de couches minces conductrices du design ICBPMAT5: a) couche de polysilicium et deux couches de métal et b) combinaison de ces couches conductrices.

E.2 Mesures profilométriques sur les couches minces CMOS exposées au TMAH

Les mesures prises avec le profilomètre Dektak (figure E.3-a) montrent que, à l'exception de la couche de passivation, les carrés contenant une seule couche du procédé ont disparus puisque l'on obtient un taux de gravure de l'ordre de grandeur du taux de gravure du substrat (environ ~ 29 µm/hr). La surface de la couche de passivation reste plane et un faible taux de gravure de 0,07 µm/hr est mesuré. Donc, le TMAH est sélectif par rapport à la couche de passivation de Mitel (pour 1 h de gravure). Le profil du silicium gravé sous le carré constitué initialement par l'oxyde de via, montre que cette couche a davantage protégé le silicium du TMAH comparativement aux autres oxydes. Une pente dans le profil de gravure traduit le fait que le TMAH débute la gravure du substrat au travers de l'ouverture directe vers le silicium située sur un seul côté du carré de couche. La figure E.3 montre les mesures prises au profilomètre Dektak des carrés de couches Mitel et des cavités micro-usinées dans le silicium après une gravure au TMAH 25% wt. à 85°C.

La figure E.3-b montre que seuls les carrés composés d'une triple couche résistent face à une gravure au TMAH de 1 h. En effet, une double couche composée de P1-M1 ou de ACT-CON, subit une gravure lors des étapes mise en forme des couches M2 et VIA respectivement. Ces doubles couches ont donc une épaisseur finale très faible et finissent par être éliminées complètement puisque le TMAH grave le silicium situé en dessous. Les empilements ACT-CON-VIA et ACT-CON-VIA-PAS apparaissent être les combinaisons de couches minces les plus résistantes dans la solution de TMAH. Quant à la triple couche P1-M1-M2, une profondeur de 1,7 µm est mesurée en prenant la surface de l'échantillon comme référence. Ainsi, selon cette mesure, la couche M2 a été entièrement gravée tandis que la couche M1 a été gravée à 70%. Or, connaissant les taux de gravure très élevés de l'aluminium dans une solution de TMAH (~ 200 µm/hr), les couches M1 et M2 auraient dû être très rapidement éliminées. Ce résultat met en évidence la présence d'une couche mince déposée (de faible épaisseur) avant chaque couche d'aluminium qui ralentirait la gravure de la couche M1 dans une solution de TMAH.

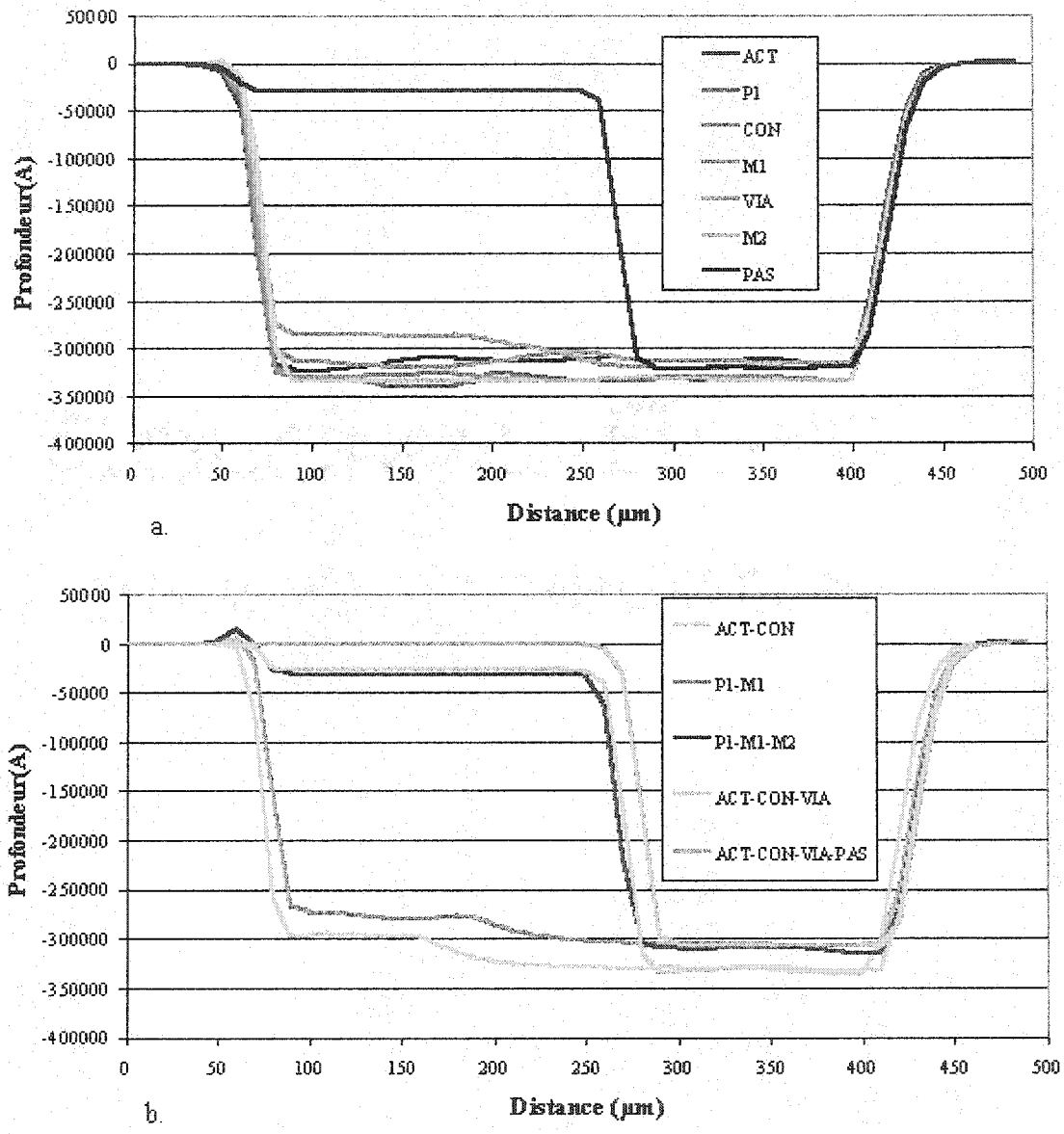


Figure E.3: Mesures au profilomètre Dektak sur un échantillon ayant subi une gravure au TMAH 25% à 85°C pendant 1 h a) couches de polysilicium et de métal b) combinaison de ces couches.

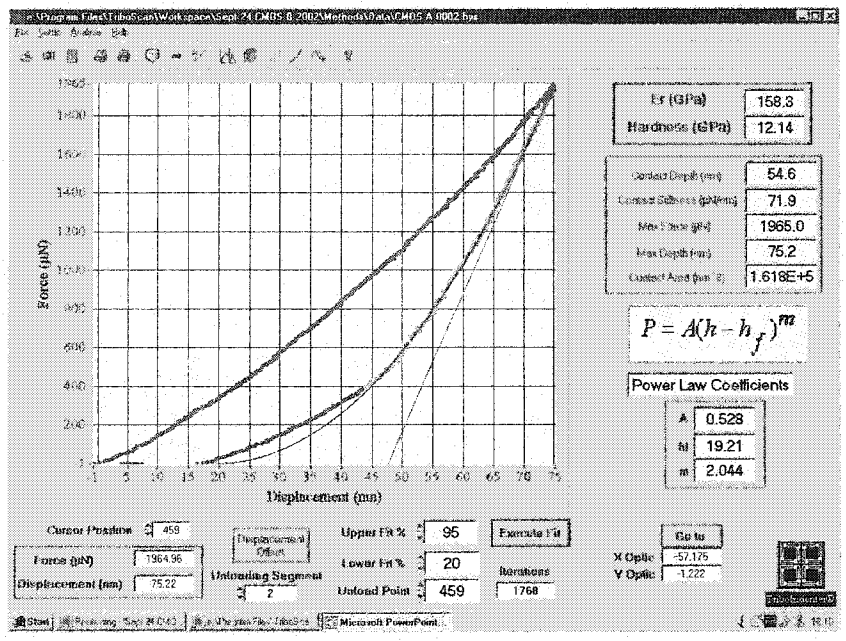
ANNEXE F

ÉVALUATION DES MODULES D'YOUNG DE COUCHES MINCES CMOS PAR NANO-INDENTATION

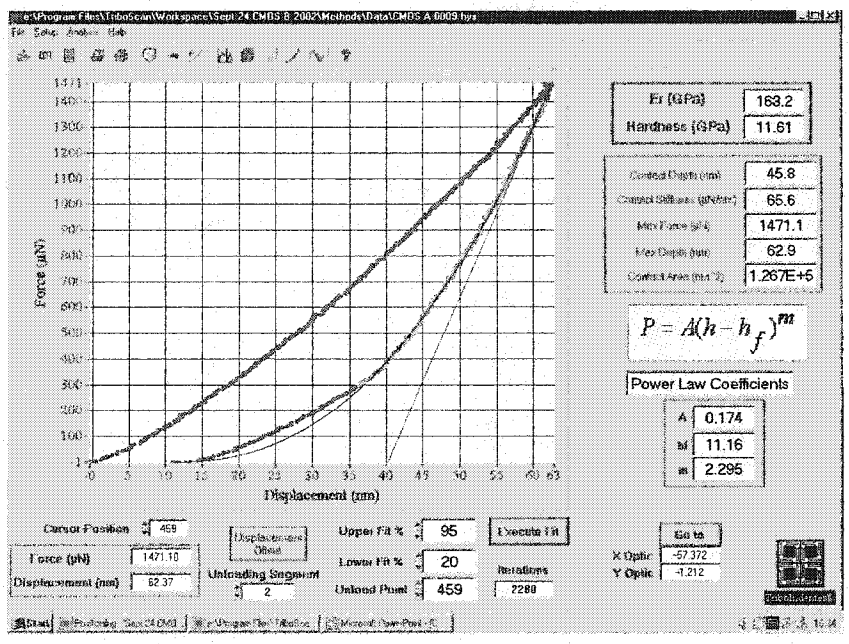
Des mesures par nano-indentation sur des carrés de couches minces ont été effectuées afin de déterminer les modules d'Young des matériaux composant le microactuateur. Nous présentons dans cette annexe l'analyse des résultats obtenus au moyen de deux nano-indenteurs différents.

F.1 Évaluation de modules d'Young avec nano-indenteur 1

La première série de mesures a été réalisée à l'aide d'un nano-indenteur (Triboindenter®) du Laboratoire de Procédé Plasma au département de génie physique. Pour chaque carré de couches minces du design ICBPMAT5, 6 micro-indentations avec une force variant de 3000 μN à 500 μN (pas de -500 μN) ont été réalisées. Les courbes présentées aux figures F.1 et F.2 montrent la force appliquée (en chargement et déchargement) en fonction de la profondeur effective d'indentation. Les mesures effectuées sur les carrés de couches minces ACT, CON, VIA, ACT-CON et ACT-CON-VIA donnent une courbe de nano-indentation similaire à celle obtenue avec le substrat de silicium. La valeur moyenne du module d'Young obtenue à partir de ces mesures est de l'ordre de 160 GPa, ce qui correspond au module d'Young du substrat de silicium tel qu'illustré sur la figure F.1. Par conséquent, les épaisseurs de ces couches minces sont trop faibles pour permettre une mesure de leurs modules d'Young effectifs. La figure F.2 montre les résultats des mesures effectuées sur les carrés de couches ACT-CON-M2 et ACT-CON-PAS. Le module d'Young de la couche de passivation est déterminé de l'ordre 135 GPa. Par contre, les différentes valeurs de modules d'Young obtenues pour la couche de métal M2 (118 GPa à 146 GPa) rendent difficile la détermination de sa valeur moyenne.

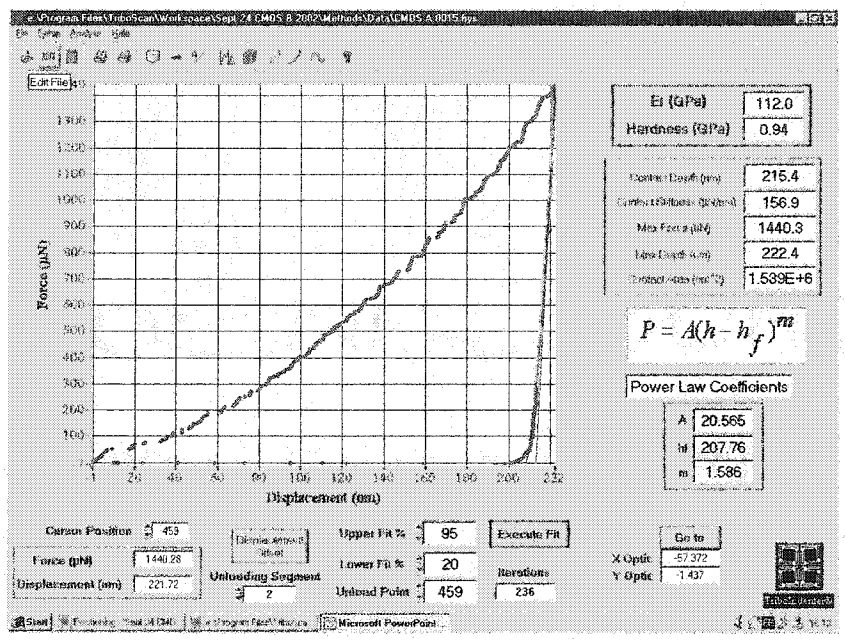


a.

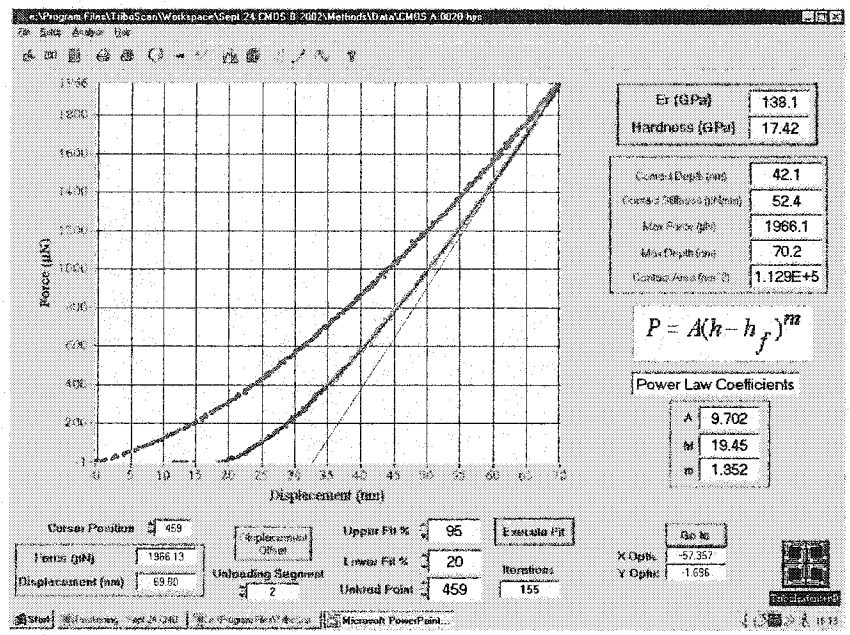


b.

Figure F.1: Mesures de modules d'Young sur: a) le substrat de silicium et b) le carré de couches minces ACT-CON du design ICBPMAT5.



c.



d.

Figure F.2: Mesures de modules d'Young sur: a) la seconde couche métallique M2 sur le carré ACT-CON-M2 et b) la couche de passivation sur le carré ACT-CON-PAS du design ICBPMAT5.

F.2 Évaluation de modules d'Young avec nano-indenteur 2

La seconde série de mesures utilise un nano-indenteur du Laboratoire microsystèmes du département "Analyses Électroniques" du Centre National d'Études Spatiales de Toulouse. Les résultats de ces mesures effectuées également sur les carrés de couches minces du design ICBPMAT5 sont présentés sur la figure F.3. Les fichiers de mesures effectuées sont traités avec un logiciel spécifique fourni par MTS qui permet de faire la moyenne de plusieurs prises de mesures sur une même courbe en indiquant en plus les écarts types. Toutes les courbes correspondent donc à une moyenne de 5 à 10 essais. Pour les courbes présentées à la figure F.3, les écarts types ont été supprimés pour plus de clarté. Les courbes obtenues montrant le module d'Young en fonction de la profondeur d'indentation pour les couches ACT et VIA sont très similaires. La courbe obtenue pour la couche CON présente plus d'irrégularité. Mais ces trois courbes semblent suivre la courbe de mesure du substrat, tel qu'observé auparavant, avec un module d'Young de l'ordre de 160 GPa. Ces valeurs autour de 160 GPa pour des couches d'oxyde de silicium paraissent très élevées. Cette valeur est atteinte rapidement, ce qui pourrait laisser croire qu'il n'y a peut-être pas de couches d'oxyde ou que leurs épaisseurs sont trop faibles. Dans tous les cas, compte tenu des épaisseurs et de la nature des couches, on atteint presque les limites du nano-indenteur. Sur la figure F.3-b, la courbe correspondant à la couche de passivation (PAS) a tendance à décroître de part la nature des couches: Si et Si_xN_y sont plus rigides que SiO_2. C'est pour cette raison que E augmente, diminue puis augmente à nouveau. La valeur moyenne du module d'Young correspondant à la couche de passivation se situe autour de 130 GPa. La courbe correspondant à la couche de métal M2 ne cesse de croître avec la profondeur d'indentation. Par conséquent, il est difficile de déterminer une valeur moyenne. On observe que la courbe M2 évolue avec la profondeur d'indentation car la tenue mécanique de l'aluminium est très différente de celle du Si de part son module d'Young plus faible (E(Al) < E (Si)). Du fait de l'épaisseur plus élevée de la couche de métal M2 par rapport aux couches diélectriques ACT, CON et VIA, l'évolution de la mesure avec la profondeur est plus distincte. Par ailleurs, on observe des bourrelets en périphérie d'empreinte, ce qui peut fausser légèrement les calculs. De plus, vu les faibles profondeurs d'enfoncement de la pointe, l'état de surface et la porosité du matériau peuvent également influencer les résultats. Sur la figure F.3-b, la courbe identifiée "SiO_2" correspond à un matériau étalon ayant un module d'Young de 70 GPa qui permet de vérifier la validité des mesures effectuées avec ce nano-indenteur.

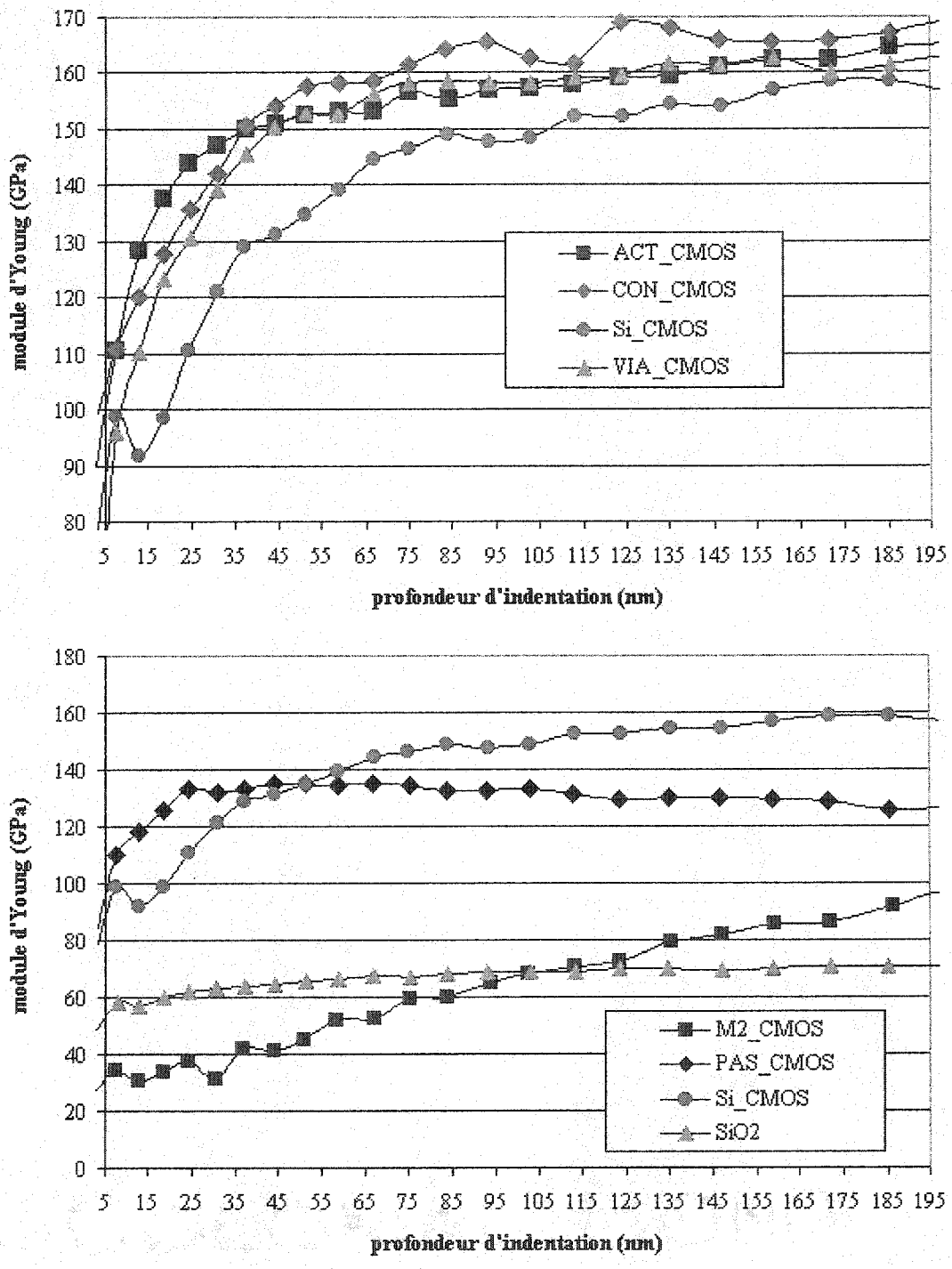


Figure F.3: Mesures par nano-indentation des modules d'Young sur les carrés de couches minces du design ICBPMAT5: a) couches diélectriques ACT, CON et VIA et substrat de Si b) couche de métal M2, couche de passivation PAS, substrat de Si et étalon de SiO_2.

Tableau F.1: Comparaison de mesures par nano-indentation sur des couches minces CMOS.

	Série de mesures 1		Série de mesures 2	
	E1 (GPa)	écart type	E2 (GPa)	écart type
Si_CMOS	162,98	7,77	158,43	7,88
ACT_CMOS	163,17	3,80	162,77	7,36
CON_CMOS	165,10	3,56	165,04	7,67
VIA_CMOS	164,59	1,36	160,80	7,90
M2_CMOS	129,44	8,74	101,54	37,60
PAS_CMOS	137,49	7,00	125,68	6,52
SiO_2 (étalon)			70,13	1,45

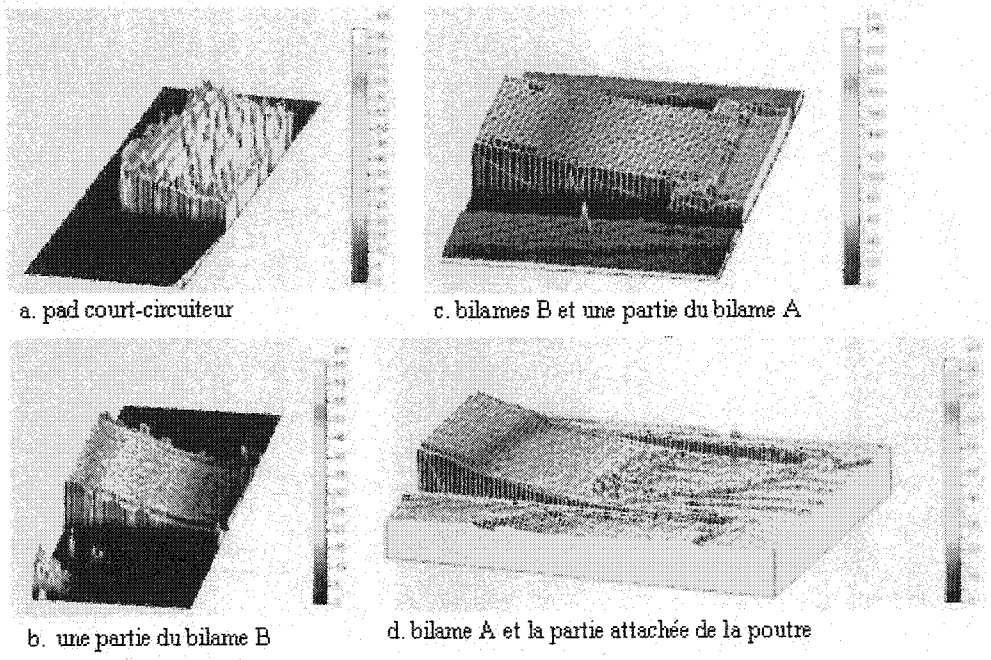
Le tableau F1 présente des mesures obtenues avec ces deux types de nano-indenteurs. Pour les couches diélectriques, la présence du substrat de silicium peut également avoir une influence sur ces estimations de modules d'Young étant donné les épaisseurs très faibles de ces couches minces. Il est également difficile de déterminer la valeur moyenne du module d'Young de la couche de métal M2. Seule une estimation du module d'Young de la couche de passivation a été faite. Il apparaît difficile de déterminer les caractéristiques des couches minces lorsque tout le procédé a été appliqué. Nous avons donc utilisé les modules d'Young provenant de publications pour les simulations du chapitre 5.

ANNEXE G

TECHNIQUES SPÉCIALES POUR LA CARACTÉRISATION DU MICROACTUATEUR

G.1 Caractérisation de la déflexion initiale par profilométrie optique 3D

Une image en 3D de la structure MEMS défléchie est obtenue à partir d'un profilomètre optique (microscopie confocale). La figure G.1 montre les profils topographiques 3D obtenus pour différentes parties de l'actuateur et le profil de déflexion obtenu avec le MEB confocal et superposé à celui précédemment obtenu au moyen du microscope optique. Il est possible d'observer que ces deux courbes de déflexion correspondent à la partie attachée de la poutre jusqu'à une portion du bilame B (figure G.1c et d). Tandis que les mesures réalisées par profilométrie optique sur le pad court-circuiteur et la partie du bilame B qui lui est adjacente (figure G.1a et b) montrent que la partie libre de la poutre est très défléchie vers le haut. Le profil obtenu à l'aide du MEB confocal se différencie nettement avec la courbe de déflexion obtenue au moyen du microscope optique à partir de x = 600 µm avec des changements de courbure et de pente dans le profil de déflexion de la poutre (figure G.1e). La poutre apparaît de longueur plus courte avec un maximum de déflexion inférieur à 300 µm. Cette courbure très accentuée de la poutre semble être une source d'erreur pour cette méthode de profilométrie optique.



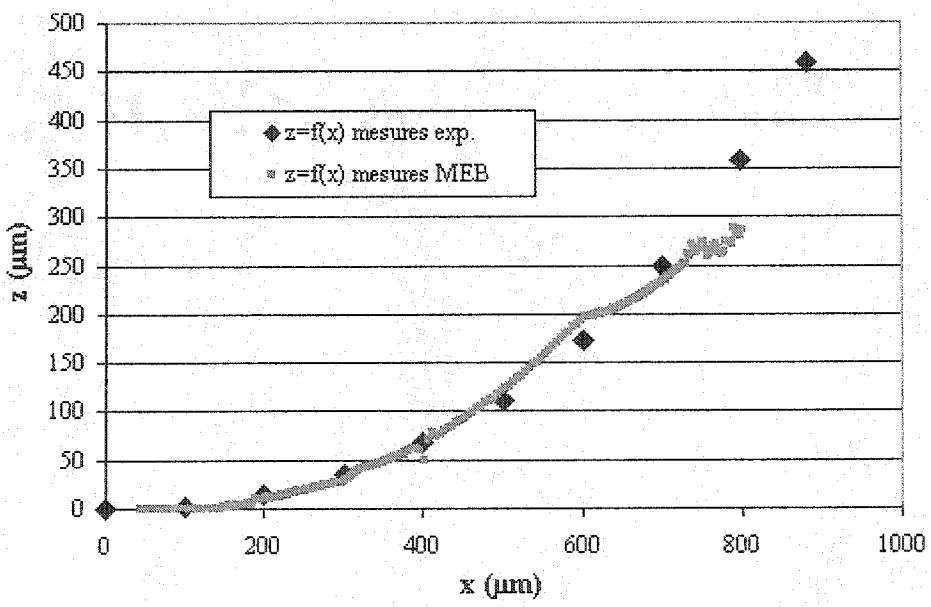


Figure G.1: Images 3D obtenues par profilométrie optique sur différentes parties du microactuateur du design ICBPMAT5 libéré et profil général de déflexion de la poutre obtenu à l'aide du MEB confocal.

G.2 Caractérisation de la fréquence de résonance du microactuateur

Une méthode de détection optique aux ultrasons [112], développée à l'Institut des Matériaux Industriels (CNRC, Boucherville), a été utilisée pour détecter les modes de résonance de deux microactuateurs du design ICBPMAT5. La figure G.2 présente une vue de l'échantillon obtenue au moyen d'une technique de tomographie optique cohérente (OCT, optical coherence tomography) [99]:

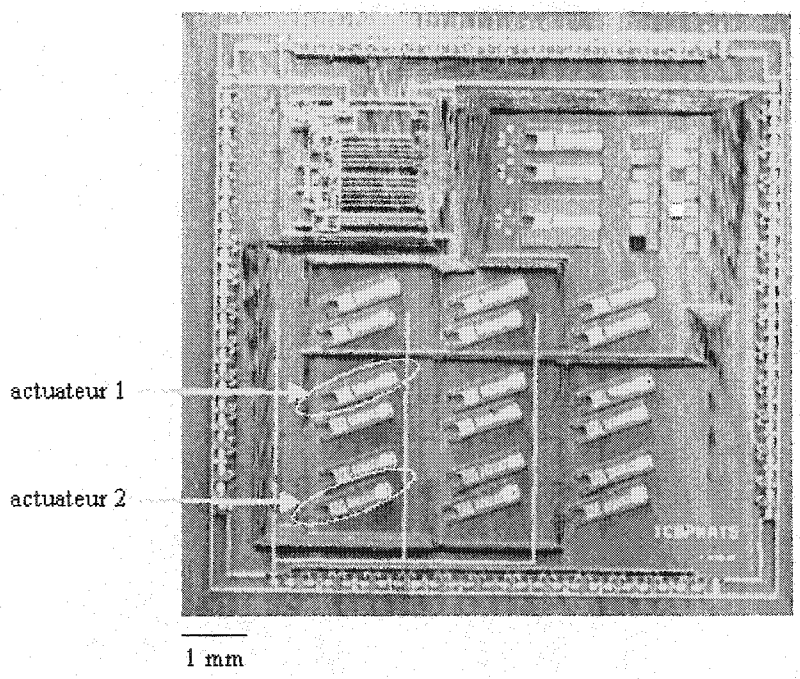


Figure G.2: Micrographie OCT montrant les deux structures en porte-à-faux du design ICBPMAT5 qui ont été caractérisées.

Les figures G.3a et G.4a montrent les signaux obtenus pour les deux actuateurs caractérisés [99]. Les fréquences de résonance de ces structures sont déterminées en effectuant une transformée de Fourier de ces signaux (figures G.3b et G.4b).

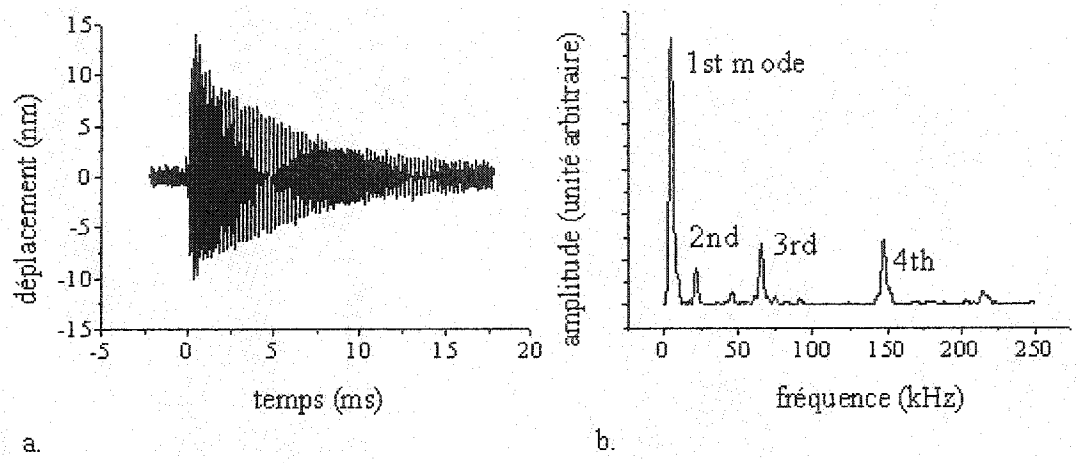


Figure G.3: Plages de temps et de fréquence pour l'actuateur 1.

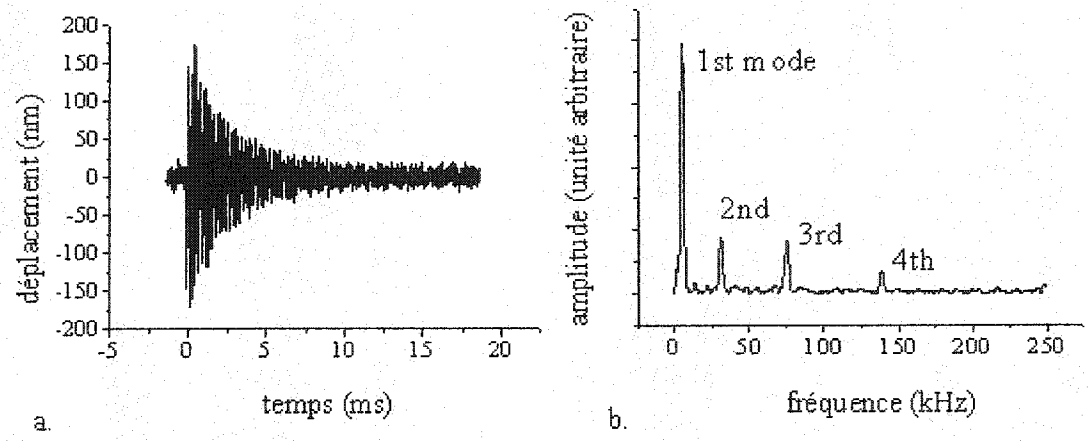


Figure G.4: Plages de temps et de fréquence pour l'actuateur 2.

Les mesures expérimentales des fréquences de résonance des actuateurs 1 et 2 sont respectivement de 4,272 kHz et 4,456 kHz.

ANNEXE H

PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS DES TRAVAUX DE RECHERCHE DE LA THÈSE

[10] Ressejac I.C., Landsberger L.M., Currie J.F. et Isnard L. (2002). Micromachining and Operation of a bistable electrothermal actuator. Can. J. Elect. Comput. Eng., 27, no.1, 41-45.

[9] Ressejac I.C., Landsberger L.M., Currie J.F. et Isnard L. (2001). Micromachining and Operation of a bistable electrothermal actuator. Canadian Workshop on MEMS/Micromachining: Applying MEMS Research in Canada, Proc. CWMEMS`01, Ottawa, Canada..

[8] Ressejac I.C., Landsberger L.M. et Currie J.F., (2001) Micromachining and Operation of a bistable electrothermal actuator. Proc. NRC-CNRC 10th Canadian Semiconductor Technology Conference, Ottawa, Canada.

[7]* Ressejac I.C., Landsberger L.M. et Currie J.F. (2000). Microfabrication of Micro-Electro-Thermal-Relays with Mitel 1.5 µm CMOS. Technology. Symposium on Microelectronics R&D in Canada Proc, TEXPO 2000, Ottawa, Canada.

[6] Ressejac I., Landsberger L.M. et Currie J.F. (2000). Bistable microelectrothermal actuator in a standard complementary metal-oxide-semiconductor process. J. Vac. Sci. Technol. A., 18, no.2, 746-749.

[5] Ressejac I. (1999). Microactuateur électrothermique bistable: Étude de la conception et de la microfabrication avec une technologie standard CMOS. Rapport prédoctoral, Département de génie physique, École Polytechnique de Montréal.

[4] Ressejac I., Landsberger L.M. et Currie J.F. (1999). Bistable Micro-Electro-Thermal Actuator: A Study of Fabrication based in a Standard CMOS Technology. Canadian Workshop on MEMS Micromachining: Applications, Devices and Technologies, Proc.CWMEMS`99, Ottawa, Canada.

[3] Ressejac I., Landsberger L.M. et Currie J.F. (1999). Bistable Micro-Electro-Thermal Actuator: A Study of Fabrication based in a Standard CMOS Technology. Proc. NRC-CNRC 9th Canadian Semiconductor Technology Conference Proc., Ottawa, Canada.

[2] Ressejac, I. (1997). Intérêt d'un micro-administrateur pharmaceutique et étude de la biocompatibilité du NiTi. Rapport de projet du cours: Introduction aux biomatériaux, École Polytechnique, Montréal.

[1] Ressejac I., (1997). Conception d'un système d'adressage microélectronique pour une matrice de micro-relais bistables. Rapport de synthèse sur l'état d'avancement de la recherche amorcée au niveau de la maitrise (M.Sc.A), Département de génie physique, École Polytechnique de Montréal.

*La présentation d'une partie des travaux de recherche de cette thèse a reçu le "Alberta Microelectronic Corporation Microsystems Design Award 2000" (devenu Micralyne Microsystems Design Award en 2001) pour "the most novel and industrially relevant research results in the areas of: MEMS, Microsystems, Materials research or system-related developments that includes research in the above areas".

Des publications sur les résultats présentés au chapitre 5, concernant la modélisation de l'actuation thermique du microactuateur, sont actuellement en préparation.