

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**CAPTEURS THERMIQUES MICRO-USINÉS :
ANALYSE ET PROPOSITION D'UNE NOUVELLE TECHNIQUE
DE CONCEPTION ET DE FABRICATION**

STÉPHANE LECLERC

**DÉPARTEMENT DE GÉNIE PHYSIQUE ET DE GÉNIE DES MATÉRIAUX
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**

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

MARS 2000

© Stéphane Leclerc, 2000



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

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 autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-53587-8

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé

CAPTEURS THERMIQUES MICRO-USINÉS :
ANALYSE ET PROPOSITION D'UNE NOUVELLE TECHNIQUE DE CONCEPTION ET
DE FABRICATION

Présenté par : Stéphane Leclerc

En vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

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

M. MARTINU Ludvik, Ph.D., président

M. MEUNIER Michel, Ph.D., directeur de recherche

M. CURRIE John F., Ph.D., codirecteur de recherche

M. AZELMAD Abdellah, Ph.D., membre

Remerciements

Je désire adresser mes premiers remerciements au jury qui me fait l'honneur de lire et juger mon mémoire : merci à M. Michel Meunier et à M. Abdellah Azelmad et tout spécialement à M. Ludvik Martinu pour avoir accepté d'en assurer la présidence.

Si, pour des raisons administratives, la page de couverture fait du professeur Michel Meunier mon directeur de recherche d'un jour (je l'en remercie), le projet a été en majeure partie effectué au Laboratoire pour l'Intégration des Senseurs et Actuateurs du professeur John F. Currie.

Je désire donc remercier mon directeur de recherche, John F. Currie, pour m'avoir accueilli au sein de sa grande équipe du LISA, pour m'avoir initié au monde plein de potentiel des MEMS, pour m'avoir soutenu financièrement et pour m'avoir aidé à développer une grande autonomie professionnelle et particulièrement en ce qui concerne la recherche.

Nombreuses sont les personnes que je dois remercier au LISA. Au tout premier rang se trouve André Lecours qui m'a accordé son grand soutien en tant de situations. Il a dirigé l'organisation du LISA d'une main de maître au cours de mes années de recherche et a su créer le climat idéal pour une recherche efficace et créative. Je pense aussi à Robert Antaki, qui fut mon mentor ès MEMS au cours des deux premières années et qui m'a transmis une petite part de sa rigueur et de sa grande curiosité intellectuelle. Gino Turcotte m'a aidé en maintes occasions en s'assurant jalousement du bien-être des appareils du laboratoire. Je dois aussi souligner le support de Mario Caron et Edwis Richard, qui sont les maîtres-d'oeuvre des micrographies MEB de ce

mémoire et qui ont approfondi ma connaissance des matériaux et ma critique de structures MEMS.

Le laboratoire LISA a compté plus de 25 personnes en certaines occasions. Je ne peux tous les nommer, mais je m'en voudrais de ne pas souligner le support et les nombreuses discussions partagées avec Abdel Essalik, Isabelle Ressejac et Danick Briand.

Je voudrais remercier les membres du groupe LPL pour le support dans ma recherche de certaines techniques laser pour les MEMS. Je remercie aussi le Prof. Landsberger de l'Université Concordia pour les nombreuses discussions entourant les MEMS.

Je remercie la Société de microélectronique du Canada (CMC) pour la microfabrication de mes circuits intégrés MEMS.

Hors du LISA, je ne peux pas oublier les nombreuses discussions scientifiques et autres avec Hugues Marchand, qui était du laboratoire MOCVD. Je remercie aussi Kostas Piyakis qui m'a supporté dans l'apprentissage du fonctionnement intime des ordinateurs et réseaux et qui m'a donné accès aux logiciels d'analyse des MEMS dont il est question au cours du mémoire.

Je dois remercier tout particulièrement les groupes de recherche des Professeurs Wertheimer et Bertrand. Ceux-ci, en m'initiant à la recherche au cours de mes études de baccalauréat, ont tout simplement pavé la voie vers la recherche et mes études de maîtrise.

Enfin, je terminerai cette litanie de remerciements en soulignant le support indéfectible de ma famille au cours de mes 20 ans d'études et plus particulièrement de ma compagne, Nathalie, qui a dû endurer les hauts, les bas et les horaires de mes études de maîtrise.

Résumé

Ce mémoire propose une nouvelle structure et un procédé de fabrication associé pour la conception de micro-systèmes électromécaniques (MEMS) thermiques en couches minces : la structure à cavité enfouie. Cette structure tire son nom et nombre de ses avantages du fait qu'elle renferme une cavité profonde cachée sous une membrane suspendue et qui n'est donc pas visible de la surface.

Cette nouvelle structure a été développée pour satisfaire les besoins de certains dispositifs thermiques. Parmi ces besoins, on retrouve une isolation thermique élevée, la possibilité de déposer des couches supplémentaires sur la structure suspendue, la possibilité de porter la membrane à une température élevée et la simplicité et la robustesse du design et de sa fabrication. De plus, elle est compatible avec les procédés de microfabrication CMOS (semiconducteur - oxyde - métal complémentaire) commerciaux.

Afin d'étudier les qualités et contraintes de ce dispositif, un ensemble d'outils d'analyse a été développé. Ces outils sont simples et ne nécessitent pas l'emploi de logiciels à éléments finis. Ce sont des considérations de design de premier ordre qui permettent de dégager les tendances de conception les plus importantes. Alors que des logiciels adéquats qui tiennent compte des effets d'ordres supérieurs commencent à peine à être offerts commercialement, ces outils demeurent parmi les seuls à rassembler les considérations physiques entourant le design des dispositifs thermiques.

Les résultats de ces analyses montrent que la technique est simple à utiliser et n'impose pas de contrainte sur la profondeur de la cavité, ce qui facilite le design de dispositifs robustes. L'isolation thermique sous vide est excellente tandis que celle sous air va de moyenne à faible. Le dépôt et la mise en forme de couches supplémentaires sont simplifiés par le fait qu'il n'y a pas de cavité profonde visible en surface. Par contre, l'utilisation de l'aluminium comme couche conductrice (pour les procédés compatibles CMOS) limite grandement la température d'une membrane chauffée parce que l'aluminium est un excellent conducteur de chaleur et qu'il est sujet à l'électromigration.

Enfin, la structure satisfait les besoins des capteurs de pression de type Pirani, des capteurs infrarouge et des capteurs de gaz à base de couche sensible. La structure offre un potentiel pour les convertisseurs de tension alternative à continue, les actuateurs thermiques de type bilame et les capteurs de contrainte de cisaillement dans les écoulements.

Abstract

This document proposes a novel structure and an associated microfabrication process for the design of integrated thermal micro electro-mechanical systems (MEMS): the buried cavity structure. The structure has been named after the fact that a deep cavity, etched from the surface, is hidden under a membrane and is not visible from the surface.

This novel structure has been developed in order to fill the needs of some specific thermal devices. Among those needs, there are high thermal isolation, the capability to deposit new layers on top of the suspended membrane, the capability to heat the membrane to a high temperature and the simplicity and robustness of the design and its fabrication. Moreover, its fabrication is fully compatible with commercial CMOS processes (complementary metal- oxide - semiconductor).

In order to study the advantages and constraints of the devices to be designed, a set of analysis tools has been developed. Those tools are simple and do not ask for the use of complex software such as finite-element analysis packages. Instead, they propose first order design considerations and help in exploring the design space. As complex software tools for the design of MEMS are just beginning to be offered on the market, the set of tools is rather unique in bringing together many physical considerations involved in the design of thermal MEMS.

The use of the analysis tools on devices designed using the novel structure show that the technique is simple to use, reduces the constraints on the cavity depth and helps in designing

robust devices. Thermal isolation under vacuum is excellent although it is medium to poor under air. The deposition and patterning of new layers over the membrane is simplified by the fact that no cavity is visible from the surface. However, the use of aluminum (in CMOS-compatible processes) as a conducting layer limits the temperature of heated membranes because aluminum is an excellent heat conductor and it is subject to electromigration.

Finally, the structure fills the needs of Pirani-type vacuum sensors, infrared sensors and sensitive layer-based gas sensors. The structure could also be used in ac-rms converters, bimorph thermal actuators and flow shear-stress sensors.

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	iv
RÉSUMÉ.....	vi
ABSTRACT.....	viii
TABLE DES MATIÈRES.....	x
LISTE DES TABLEAUX.....	xvi
LISTE DES FIGURES.....	xviii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS.....	xxi
CHAPITRE I : INTRODUCTION.....	1
1.1 Capteurs et actionneurs intégrés en couches minces.....	1
1.2 Micro dispositifs thermiques intégrés en couches minces.....	3
1.3 Un projet de recherche et développement ou un projet de conception.....	5
1.4 Objectifs du mémoire.....	6
1.4.1 Objectif 1.....	8

1.4.2	Objectif 2.....	9
1.4.3	Objectif 3.....	10
1.4.4	Objectif 4.....	10
1.5	Organisation du document.....	11

CHAPITRE II : CONSIDÉRATIONS DE DESIGN DE CAPTEURS

THERMIQUES EN COUCHES MINCES.....12

2.1	Capteurs intégrés en couches minces et besoins en termes de conception.....	12
2.1.1	Le capteur thermique de pression.....	14
2.1.2	Le capteur de gaz à base de couche sensible.....	17
2.1.3	Le capteur de tension moyenne d'un signal variable.....	19
2.1.4	Le capteur infrarouge.....	19
2.2	Analyse des designs de capteurs thermiques : motivations et limitations des outils actuels.....	20
2.3	Considérations thermiques.....	23
2.3.1	Conduction.....	24

2.3.2	Convection.....	28
2.3.3	Radiation.....	30
2.3.4	Conduction totale et expressions unificatrices.....	31
2.3.5	Analogie électrique et intégration dans un circuit électrique.....	35
2.4	Considérations mécaniques.....	36
2.5	Analyse thermomécanique.....	45
2.6	Analyse thermoélectrique.....	47
2.7	Analyse électrostatique (électro-mécanique).....	52
2.8	Simplicité et robustesse de la fabrication.....	54
2.9	Sommaire des relations importantes.....	55
CHAPITRE III : ÉTAT DE L'ART.....		58
3.1	Les procédés de microfabrication de circuits intégrés.....	59
3.2	Les designs traditionnels et leurs procédés de fabrication : les trois méthodes principales.....	63
3.3	La gravure anisotrope par la face arrière du dé.....	65

3.4	La gravure anisotrope par la face avant du dé.....	74
3.5	La gravure sacrificielle de couches minces en surface du dé.....	82
3.6	Les autres techniques.....	87

CHAPITRE IV : DESIGN PROPOSÉ : CONCEPT ET PROCÉDÉ DE

	FABRICATION.....	90
4.1	Technique proposée : la structure à cavité enfouie.....	91
4.1.1	Présentation de la technique.....	91
4.1.2	Variations autour de la même structure.....	100
4.2	Structures apparentées.....	101

CHAPITRE V : RÉSULTATS.....110

5.1	Analyse thermique.....	111
5.1.1	Conduction thermique sous vide.....	111
5.1.2	Conduction dans l'air.....	112
5.2	Considérations mécaniques.....	114
5.3	Considérations thermomécaniques.....	116

5.4	Considérations thermoélectriques.....	117
5.5	Considérations électrostatiques (électromécaniques).....	118
5.6	Considérations sur la simplicité et la robustesse de la fabrication.....	119
5.7	Résultats de fabrication.....	121
CHAPITRE VI : DISCUSSION.....		122
6.1	Utilisation pour les capteurs désirés.....	129
6.1.1	Capteur de pression.....	129
6.1.2	Capteur de gaz à base de couche sensible.....	132
6.1.3	Capteur de tension moyenne d'un signal variable.....	133
6.1.4	Capteur infrarouge.....	134
6.2	Autres applications.....	135
6.2.1	Actuateurs thermiques : bilames.....	135
6.2.2	Autres capteurs thermiques.....	138
CHAPITRE VII : PERSPECTIVES.....		140
7.1	Modélisation des capteurs.....	140

7.2	Fabrication de capteurs à cavité enfouie.....	142
7.3	Intégration dans un circuit.....	142
7.4	Étude plus poussée du concept et de sa technique de fabrication.....	144
7.5	Développement d'autres outils d'analyse simples pertinents.....	145
7.6	Développement d'outils de caractérisation de la fabrication.....	145
CHAPITRE VIII : CONCLUSION.....		146
BIBLIOGRAPHIE.....		151

Liste des tableaux

Tableau 2.1	Conductivité thermique de matériaux de la microélectronique et divers....	27
Tableau 2.2	Contraintes résiduelles dans des couches minces déposées dans un procédé de microélectronique commercial.....	38
Tableau 2.3	Propriétés mécaniques de différents matériaux de la microélectronique....	41
Tableau 3.1	Besoins thermiques des différents capteurs.....	59
Tableau 3.2	Avantages et désavantages des techniques traditionnelles : gravure anisotrope de volume par la face arrière du dé.....	73
Tableau 3.3	Résultats obtenus en utilisant la gravure anisotrope de volume par la face arrière du dé.....	74
Tableau 3.4	Avantages et désavantages des techniques traditionnelles : gravure anisotrope de volume par la face avant du dé (face).....	81
Tableau 3.5	Résultats obtenus en utilisant la gravure anisotrope de volume par la face avant du dé (face).....	81
Tableau 3.6	Avantages et désavantages des techniques traditionnelles : gravure sacrificielle de couches minces en surface du dé (sacrificielle).....	86

Tableau 3.7	Résultats obtenus en utilisant la gravure sacrificielle de couches minces en surface du dé (sacrificielle).....	87
Tableau 4.1	Avantages et désavantages des techniques traditionnelles.....	91
Tableau 4.2	Avantages et désavantages des techniques de la cavité enfouie.....	100

Liste des figures

Figure 2.1	Structures types des capteurs.....	14
Figure 2.2	Modes de transport de chaleur dans un capteur type.....	24
Figure 2.3	Modes de transport de chaleur.....	32
Figure 2.4	Volume type utilisé pour la simulation thermique avec le logiciel de simulation Spice.....	36
Figure 2.5	Élévation d'un pont ou d'une membrane suite à des contraintes résiduelles dans une couche.....	39
Figure 2.6	Micrographie MEB d'une partie d'un circuit obtenu à l'aide d'un procédé CMOS commercial.....	44
Figure 2.7	Topologies de la résistance de chauffage.....	48
Figure 3.1	Les trois designs traditionnels et leurs procédés de fabrication.....	64
Figure 3.2	Procédé de fabrication typique pour la gravure anisotrope par la face arrière du dé.....	66
Figure 3.3	Différentes vues d'un design fabriqué par gravure anisotrope par la face arrière du dé.....	67

Figure 3.4	Propriété des graveurs anisotropes : plus grand rectangle.....	70
Figure 3.5	Propriété des graveurs anisotropes : gravure à angle.....	71
Figure 3.6	Procédé de fabrication typique pour la gravure anisotrope par la face avant du dé.....	75
Figure 3.7	Différentes vues d'un design fabriqué par gravure anisotrope par la face avant du dé.....	76
Figure 3.8	Vue en surface du déroulement d'une gravure anisotrope de la face avant.....	78
Figure 3.9	Procédé de fabrication typique pour la gravure sacrificielle en surface du dé.....	82
Figure 3.10	Différentes vues d'un design fabriqué par gravure sacrificielle en surface du dé.....	83
Figure 3.11	Utilisation de la soudure de gaufres et de l'amincissement de gaufres pour former des capteurs thermiques.....	88
Figure 4.1	Procédé de fabrication pour la technique de la cavité enfouie.....	92
Figure 4.2	Différentes vues d'un design fabriqué la technique de la cavité enfouie....	94
Figure 4.3	Structures apparentées.....	105

Figure 5.1	Micrographie MEB d'une structure à ouverture minimale obtenue par fabrication au laboratoire LISA.....	122
Figure 5.2	Micrographie MEB d'une structure en croix obtenue par fabrication commerciale et post fabrication au laboratoire LISA.....	123
Figure 5.3	Micrographie MEB d'une structure à bras allongés complexes obtenue par fabrication commerciale et post fabrication au laboratoire LISA.....	124
Figure 5.4	Micrographie MEB d'une structure à bras allongés complexes obtenue par fabrication commerciale et post fabrication au laboratoire LISA (détail).....	125
Figure 6.1	Applications des actuateurs thermiques.....	136

Liste des sigles et abréviations

CMOS :	Complementary metal oxide semiconductor. Procédé de microfabrication de circuits intégrés semiconducteurs - oxyde - métal complémentaires.
ECR-PCVD:	Dépôt par vapeurs chimiques assisté par plasma à résonance électronique cyclotronique
EDP:	Solution de éthylènediamine et de pyrocatechol
KOH:	Hydroxyde de potassium
LISA:	Laboratoire pour l'intégration des senseurs et actuateurs
LPCVD:	Dépôt par vapeurs chimiques à faible pression
MEB:	Microscopie électronique à balayage
MEMS:	Micro-electro-mechanical systems. Systèmes micro-électro-mécaniques.
PECVD:	Dépôt par vapeurs chimiques assisté par plasma
Rms	Root-mean-square. Valeur moyenne d'un signal obtenue par la racine de la moyenne de la valeur au carré du signal sur la période.
TMAH:	Hydroxyde de tétraméthylammonium

A:	Surface
b:	Largeur
C:	Capacité électrique
C_p :	Capacité thermique du matériau
d:	Distance entre deux surfaces
e:	Épaisseur
E:	Module d'Young
F:	Force
g:	Accélération gravitationnelle
G:	Conductance thermique
G_0 :	Conductance thermique (voir G_0P_0)
G_0P_0 :	Conductance thermique par unité de surface à pression atmosphérique
Gr:	Nombre de Grashof
h:	Hauteur, élévation

I :	Moment d'inertie
k :	Conductivité thermique
K :	Limite de courant par unité de largeur de ligne
Kn	Nombre de Knudsen.
l :	Longueur, distance entre deux points
L :	Longueur
P :	Pression : Puissance électrique
P_0 :	Pression de transition (voir G_0P_0)
q :	Flux thermique : Charge
q_{th} :	Puissance thermique par unité de volume
r :	Rayon de courbure
R :	Résistance électrique
Ra :	Nombre de Rayleigh
R_c :	Résistance feuille
t :	Épaisseur

T :	Température
V :	Tension
w :	Largeur
W :	Largeur
y :	Espacement
α :	Coefficient d'accommodation des gaz : diffusivité thermique
β :	Inverse de la température absolue
ε :	Émissivité de la surface : Élongation : Permittivité électrique
ε_0 :	Permittivité électrique du vide
γ :	Ratio de la chaleur spécifique à pression constante sur la chaleur spécifique à volume constant
λ :	Libre parcours moyen
ν :	Viscosité cinématique du fluide
ρ :	Masse volumique
σ :	Constante de Stefan-Boltzmann: Contrainte mécanique

Chapitre I

Introduction

1.1 Capteurs et actuateurs intégrés en couches minces

Depuis une vingtaine d'années environ, des chercheurs ont commencé à vouloir tirer parti des propriétés autres qu'électroniques du silicium qu'ils utilisaient pour fabriquer des circuits intégrés. En effet, le silicium est piézorésistif, c'est-à-dire que sa résistance change selon les contraintes mécaniques qu'il subit. La trajectoire des électrons est altérée par la présence d'un champ magnétique selon l'effet Hall. Son comportement en général varie avec la température. Enfin, le silicium est aussi fort mécaniquement que l'acier.

Dans un deuxième temps, on a voulu prendre avantage du procédé de fabrication des circuits intégrés et donc des couches minces qui sont déposées sur le substrat de silicium. Pour cela, souvent, il fallait libérer localement les couches minces du substrat sur lequel elles étaient déposées. Le micro-usinage du silicium naissait.

Au cours de la dernière décennie, le potentiel des micro-capteurs a été reconnu commercialement et les techniques de micro-usinage ont fait l'objet de recherches intenses. Si le procédé de fabrication des circuits intégrés limite la performance d'un dispositif, on modifie, on ajoute ou on retire des couches. Si le substrat de silicium pose problème, on le remplace par un autre. Ainsi, ces dernières années ont vu une explosion de nouveaux capteurs et actuateurs et des procédés de fabrication associés proposés par des groupes de recherche.

Malgré tout, le potentiel commercial des micro-capteurs mécaniques, nommés aussi systèmes micro électromécaniques (MEMS), ne s'est pas développé aussi rapidement qu'on le pensait. Il est vrai que les projections étaient optimistes. On croyait candidement que les dispositifs allaient atteindre rapidement le marché et remplacer des produits reconnus. Le marché n'a pas accepté aussi facilement les nouveaux produits.

Il faut noter que les procédés de fabrication des nouveaux capteurs étaient souvent complexes. Le succès économique du marché des circuits intégrés provient dans une bonne part du faible coût unitaire de production, qui lui-même vient de la production en grand volume. Les nouveaux procédés de fabrication, qui utilisent des matériaux et de l'équipement non traditionnel, et les plus faibles volumes des MEMS ne se prêtent pas toujours à ces économies d'échelle.

Cela explique pourquoi, parmi toutes les options proposées chaque année à travers le monde, seul un petit nombre de techniques de fabrication et de designs est relié à des succès commerciaux du domaine des MEMS.

Parmi celles-ci, deux techniques se sont imposées récemment [1,2]. La première consiste à développer un procédé MEMS standard, comme le procédé MUMPS offert par le Microelectronic Center of North Carolina (MCNC) ou le procédé IMEMS développé par la compagnie Analog Devices. Ces procédés offrent des matériaux et des caractéristiques mécaniques plus appropriés au MEMS que les procédés de circuits intégrés standards. Cependant, ils sont plus coûteux, car le volume de production n'est pas élevé, et la flexibilité est plus limitée qu'un procédé totalement dédié à une application.

La seconde technique de fabrication qui s'est imposée est l'emploi, dans un premier temps, d'un procédé de fabrication intégré CMOS (semiconducteur-oxyde-métal complémentaire) complet et sans modification et dans un second temps, d'étapes simples de microfabrication par la suite (nommées étapes de "post-processing"). Ce procédé est dit compatible avec la microfabrication CMOS ("compatible CMOS"). Cette façon de faire présente les avantages de profiter des faibles coûts unitaires des circuits intégrés et de limiter les besoins en équipement. De plus, l'intégration du capteur à une électronique d'excitation, de lecture et de traitement de signal rend le dispositif encore plus intéressant.

De ces deux techniques, nous avons choisi cette dernière, le développement de ce projet de concevoir un dispositif dont la fabrication est compatible CMOS, car elle nous était plus accessible et était plus appropriée à nos besoins.

1.2 Micro dispositifs thermiques intégrés en couches minces

Les dispositifs thermiques sont parmi les capteurs les plus répandus dans l'industrie. On compte parmi eux le thermomètre, le thermostat, le capteur de débit, la caméra infrarouge, le capteur thermique de pression, certains capteurs de gaz, etc. Pour ces capteurs, il s'agit de mesurer un signal électrique - un courant, une tension, une résistance, une déformation mécanique, un nombre de charges, etc. - qui représente une température en un point donné. La température est elle-même une mesure de l'énergie électrique, mécanique, lumineuse, chimique, etc. dissipée en un endroit.

La relative simplicité de traduire une température en un signal électrique explique le grand intérêt de plusieurs groupes de recherche de développer des MEMS thermiques. En effet, le procédé de microfabrication CMOS traditionnel permet de mesurer une température ou le débit de photons infrarouges : une jonction polysilicium-aluminium mesure la température selon l'effet thermoélectrique ; tous les matériaux ont une résistance qui varie avec la température (effet thermorésistif) ; tous les dispositifs à base de jonction pn ont un comportement qui varie avec la température ; enfin, une jonction pn peut mesurer le débit de photons.

Pour plusieurs projets poursuivis au Laboratoire LISA du Département de génie physique de l'École Polytechnique de Montréal, les dispositifs thermiques sont une option valable ou indispensable. Le micro administrateur pharmaceutique [3] nécessite un actuateur pour ouvrir une cavité. Une matrice de relais bistables permet de commuter un signal entre différentes entrées et différentes sorties [4]. Un capteur de gaz à base de couche sensible doit être porté à une température donnée afin d'offrir les meilleures performances en termes de sensibilité et de sélectivité [5,6,7,8]. Dans tous ces cas, une ou la solution consiste à chauffer localement une région isolée thermiquement afin de hausser la température avec la plus faible consommation énergétique et la plus faible dispersion de chaleur possible. D'autres capteurs se sont révélés intéressants : le capteur thermique de pression, le capteur de tension rms, etc. Ces capteurs mesurent la température atteinte en un point thermiquement isolé : l'isolation thermique procure une plus grande variation de température en fonction du signal à mesurer.

Comme il sera présenté en détail au chapitre trois, l'étude des structures traditionnelles pour les dispositifs thermiques a mené à la conclusion que ces derniers ne satisfont pas pleinement les besoins en termes de conception et de fabrication de certains capteurs et actionneurs qui nous

intéressent. C'est ce qui a mené à la recherche d'une autre technique de fabrication de capteurs thermiques, d'une autre conception de capteurs thermiques, qui pourraient mieux satisfaire ces besoins.

Ce mémoire est la présentation d'un nouveau design et d'un nouveau procédé de fabrication pour les capteurs thermiques. L'application de ce nouveau capteur thermique à différentes applications traditionnelles est ensuite étudiée.

1.3 Un projet de recherche et développement ou un projet de conception

Ce projet est-il un projet de recherche ou un projet de conception ? La question mérite d'être posée, surtout que la réponse est féconde. À ce sujet, le Pr. Senturia, du MIT (Massachusetts Institute of Technology), un pionnier du domaine, affirmait :

"While there have been diverse and astonishing advances in the development of technologies and device concepts for microsensors and microactuators, it is still largely true that the creation of a new device is a research and development project instead of a design project.(...) By that, I mean that the designer lacks the modeling tools to explore the design space without extensive experimentation." [9]

Le développement d'un nouveau capteur thermique relève donc plus de la recherche que de la conception, parce que les outils de conception adéquats n'existent pas encore.

Afin de bien juger de la qualité et du potentiel du dispositif proposé, il faut disposer d'outils d'analyse. Malheureusement, comme l'affirme le Prof. Senturia, à l'heure actuelle, les outils qui permettraient d'explorer l'espace de conception n'existent pas. Il s'agit donc, pour les besoins du mémoire et dans une perspective plus générale, avant même de proposer un nouveau capteur, de développer un ensemble qui permettront de mesurer les avantages, désavantages, contraintes et limites des designs actuels et proposés.

1.4 Objectifs du mémoire

Les sections précédentes avaient pour but de dégager les éléments suivants :

- Les dispositifs micro électromécaniques possèdent un grand potentiel pour le développement ou le remplacement de capteurs.
- Parmi ces dispositifs, les capteurs thermiques revêtent un grand intérêt dû à leur grande place sur le marché.
- Malheureusement, les designs et procédés de fabrication actuels ne satisfont pas pleinement les besoins de certains des capteurs que l'on désire fabriquer.
- Un des plus grands facteurs d'insuccès des MEMS sur le marché actuel réside dans la complexité de la fabrication ; c'est pourquoi un procédé compatible CMOS a été choisi dès le départ.

- Le développement d'un dispositif thermique MEMS constitue souvent un projet de recherche plus qu'un projet de conception car les outils d'analyse et de simulation du dispositif dans son ensemble n'existent pas.

À partir de ces observations, les objectifs du mémoire sont les suivants :

- 1) définir un ensemble d'outils d'analyse des dispositifs thermiques en couches minces ;
- 2) proposer un nouveau dispositif thermique et un procédé de fabrication associé afin de satisfaire des besoins qui ne sont pas comblés par les techniques actuelles ;
- 3) effectuer une analyse critique du nouveau dispositif ;
- 4) étudier l'emploi du nouveau dispositif pour des applications de capteur ou actuateur thermique.

Ce mémoire ne prétend pas donner une analyse exhaustive qui pourrait s'appliquer à tous les dispositifs thermiques. Les capteurs thermiques qui nous intéressent dans un premier temps sont les suivants :

- le capteur thermique de pression ;
- le capteur de gaz à couche sensible ;
- le capteur infrarouge à couche sensible ;
- le capteur de tension moyenne rms.

Les outils d'analyse sont développés dans l'optique de leur utilisation pour l'étude de ces capteurs. La nouvelle structure sera critiquée en comparaison avec les techniques traditionnelles pour ces capteurs particuliers. Ces dispositifs présentent des caractéristiques générales qui couvrent un grand éventail des dispositifs thermiques en général et ils ont été fabriqués avec les techniques traditionnelles. Le chapitre six s'intéresse toutefois, en moindres détails, à plusieurs autres dispositifs thermiques qui pourraient faire usage de la nouvelle structure.

1.4.1 Objectif 1 : Définition d'un ensemble d'outils d'analyse des dispositifs thermiques en couches minces

Il s'agit de rassembler pour la première fois des outils d'analyse des dispositifs thermiques en couches minces. Plus souvent qu'autrement, les publications étudient en profondeur le comportement thermique du dispositif et parfois font le lien avec le signal électrique mesuré.

Par contre, on publie rarement les implications mécaniques, thermomécaniques et électromécaniques d'un design et de son procédé de fabrication.

Plus encore, on retrouve presque jamais une analyse complète, c'est-à-dire une analyse qui tienne compte à la fois des considérations thermique, mécanique, électrique, thermomécanique, etc. et qui indique les compromis nécessaires et l'impact du choix de certains matériaux ou de certaines dimensions sur le comportement général du dispositif.

Il est vrai que les raisons les plus importantes de cette lacune sont probablement que les solutions analytiques précises n'existent pas pour ces dispositifs complexes, que les valeurs précises des paramètres physiques des matériaux utilisés sont inconnues et que les outils

informatiques actuels ne permettent pas de faire adéquatement cette analyse avec une précision et dans un temps raisonnable.

Ces limitations, si elles définissent une borne supérieure à la précision de l'analyse possible, ne rendent pas moins pertinentes l'analyse de l'espace de conception. Par conséquent, nous avons choisi d'assembler et de développer pour ce mémoire des outils d'analyse simples. Ces outils seront plus souvent qu'autrement des équations algébriques. Ainsi, ces calculs pourront donner rapidement les contraintes et limites du design, les éléments délicats du design et, pourquoi pas, les caractéristiques qui nécessiteront une analyse plus approfondie.

Cet ensemble d'outils d'analyse a pour objectif de donner un cadre à la critique rationnelle des différents designs et procédés de fabrication des capteurs thermiques qui nous intéressent.

1.4.2 Objectif 2 : Développement d'un nouveau dispositif thermique et d'un procédé de fabrication associé afin de satisfaire des besoins qui ne sont pas comblés par les techniques actuelles

On le verra au cours des chapitres suivants, plusieurs techniques ingénieuses ont été développées et sont devenues "traditionnelles" pour la conception de capteurs thermiques. Par contre, certains besoins propres ne sont pas satisfaits de façon adéquate par ces designs.

Par exemple, le capteur de gaz à couche sensible, comme son nom l'indique, est fait d'une couche sensible déposée sur une plaque chauffante. Il faut s'assurer que la mise en forme de cette couche n'altère pas les caractéristiques de la couche. D'autre part, le capteur thermique de pression offre de meilleures performances lorsque la distance entre la membrane chauffée et le

substrat est faible. Cependant, la performance se dégrade si cette distance varie en cours de fonctionnement ou d'un dispositif à un autre à cause de considérations de design comme les contraintes dans les couches, les contraintes thermomécaniques, etc.

Le nouveau dispositif aura pour objectif de satisfaire ces besoins particuliers des dispositifs qui nous intéressent.

1.4.3 Objectif 3 : Analyse critique du nouveau dispositif

À l'aide des outils d'analyses développés dans l'atteinte du premier objectif, le nouveau dispositif thermique est analysé pour en tirer les relations entre les différents paramètres du design.

1.4.4 Objectif 4 : Étude de l'emploi du nouveau dispositif pour des applications de capteur ou actuateur thermique.

À l'aide des résultats de l'analyse critique, l'application du dispositif aux applications prévues peut être effectuée. On peut alors vérifier si les besoins en termes de conception des différents capteurs sont satisfaits. Si ce n'est pas le cas, des solutions sont proposées ou un constat d'échec est rendu.

Par la suite, on peut aussi étendre l'étude de l'emploi du dispositif à d'autres capteurs ou actionneurs thermiques qui n'ont pas été décrits en détail au cours du mémoire mais qui constituent ou non des avenues possibles d'utilisation du design et de la méthode de fabrication.

1.5 Organisation du document

Au plan de l'organisation, ce mémoire poursuit les 4 objectifs dans l'ordre.

Le chapitre 2 constitue le chapitre de la méthodologie de la conception des capteurs thermiques. Après avoir introduit quelques dispositifs thermiques types, il définit les outils d'analyse nécessaire à leur conception.

Le chapitre 3 présente l'état de l'art en termes de designs et de procédés de fabrication. Le nouveau dispositif et son procédé de fabrication sont proposés au chapitre 4.

Le chapitre 5 donne les résultats des analyses développées au chapitre 2 sur le nouveau capteur. L'application de la nouvelle technique à divers dispositifs thermiques est discutée au chapitre 6.

Enfin, le chapitre 7 suggère quelques directions pour le développement ultérieur du nouveau dispositif, de ses applications et de son analyse.

Chapitre II

Considérations de design de capteurs thermiques en couches minces

Ce chapitre a pour objectif de cerner le sujet d'un point de vue technique en présentant les dispositifs traditionnels et les considérations physiques qui encadrent leur conception.

Dans un premier temps, le capteur thermique type est illustré. Puis, les quatre capteurs thermiques visés sont présentés en détail afin de bien dégager les besoins propres de ces capteurs en termes de conception.

Enfin, le chapitre se termine avec la présentation des outils d'analyse physique des capteurs thermiques nécessaires à la critique des designs.

2.1 Capteurs thermiques en couches minces et besoins en termes de conception

Plusieurs capteurs et actuateurs tirés de phénomènes thermiques peuvent être conçus et fabriqués, dans des buts différents et selon des critères de conception différents. Parmi ceux-ci, nous avons choisi quatre dispositifs thermiques qui répondent à des besoins particuliers de projets de recherche au LISA ou pour lesquels l'industrie et le domaine académique ont montré un intérêt pour la mise en forme de couches minces et l'intégration dans des procédés de microélectronique commerciaux. Les besoins de ces capteurs en termes de conception sont

représentatifs des différents besoins particuliers des capteurs thermiques en général. Les quatre capteurs choisis sont :

- Le capteur thermique de pression :
- Le capteur de gaz à couche sensible :
- Le capteur de tension moyenne rms :
- Le capteur infrarouge.

Afin de donner tout de suite un cadre aux concepts qui seront présentés au cours de ce chapitre, la figure 2.1 présente la structure type des dispositifs. Les dimensions et matériaux types du dispositif sont les suivants :

- Substrat de silicium d'environ $500\mu\text{m}$ d'épais ;
- Membrane ou pont suspendu au-dessus du vide, faite d'un empilement de couches telles l'oxyde et le nitrure de silicium et l'aluminium, de 1 à $5\mu\text{m}$ d'épais ;
- Cavité sous la membrane de profondeur faible (moins de $1\mu\text{m}$ à quelques microns) ou profonde (quelques centaines de microns).

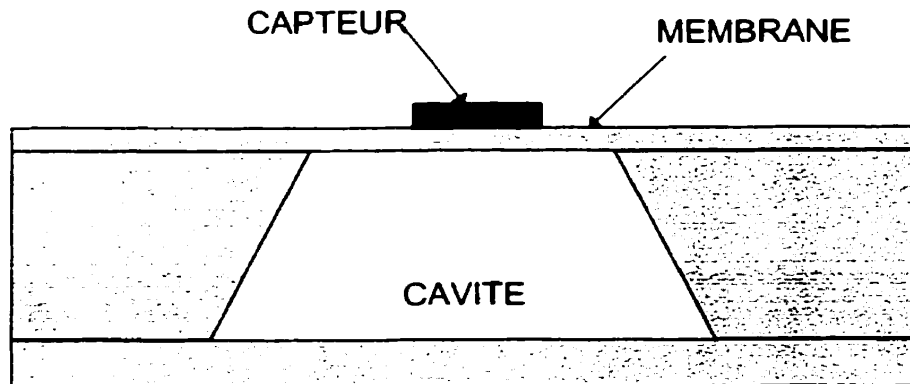


Figure 2.1 Structure type d'un capteur traditionnel. Dans tous les cas, le substrat fait quelques centaines de microns et la membrane ne fait que quelques microns d'épaisseur. La distance verticale entre la membrane et le substrat peut varier entre une fraction de microns et quelques centaines de microns selon le dispositif.

2.1.1 Le capteur thermique de pression

À pression atmosphérique dans une enceinte de grande dimension, la conductivité thermique d'un gaz est indépendante de la pression. Par contre, si la pression ou la dimension de l'enceinte est réduite de telle façon que le libre parcours moyen des molécules du gaz est de dimension comparable à la distance entre deux parois de l'enceinte, la conductivité thermique devient proportionnelle à la pression. La mesure de la conduction de la chaleur entre les deux parois donne alors une mesure indirecte de la pression. Ce principe est à la base des capteurs thermiques de pression, nommés capteurs Pirani, du nom de leur inventeur italien.

On explique ce changement de comportement de la conductivité thermique de la façon suivante. À haute pression, les molécules subissent plusieurs collisions entre deux surfaces et la

conduction est indépendante de la pression. Toutefois, à mesure que la pression baisse ou que les surfaces se rapprochent, la distance entre les surfaces devient comparable puis plus petite que le libre parcours moyen des molécules : le taux de transfert de chaleur devient alors proportionnel au nombre de porteurs de chaleur, c'est-à-dire au nombre de molécules et à la pression.

On distingue trois régimes, que l'on départage à l'aide du nombre de Knudsen Kn . Ce nombre exprime le rapport entre le libre parcours moyen λ et la distance d entre les deux parois :

$$Kn = \frac{\lambda}{d} \quad (2.1)$$

Le régime de conduction proportionnelle au nombre de molécules, dit le régime moléculaire, affiche un nombre de Knudsen supérieur à 1. Le régime continu, pour lequel la conduction est indépendante de la pression, présente un nombre de Knudsen inférieur à 0,01. Entre les deux, le régime est dit de transition.

Une relation empirique exprime la conduction thermique selon la pression pour les trois régimes [10] :

$$G = G_0 \frac{PP_0}{P + P_0} \quad \text{où } G_0 P_0 = \frac{k_{AIR}}{d_{GAP}} \quad \text{si } Kn (d_{GAP}) > 1 \quad (2.2)$$

$G_0 P_0$ est la conductance thermique du gaz par unité de surface à pression atmosphérique dans une enceinte de grande dimension et P_0 est une pression fonction de la distance entre les surfaces et de la nature du gaz où commence le régime moléculaire. La pression de transition est d'autant

plus élevée que la distance entre les surfaces est petite. En effet, on relie la pression de transition à la distance en utilisant la relation [10] :

$$P_0 = \frac{9\gamma - 5}{\gamma + 1} \frac{\lambda_{1Pa}}{\alpha \cdot d_{GAP}} \cdot 1Pa \quad (2.3)$$

Dans cette relation pour la pression de transition, γ est le ratio de la chaleur spécifique à pression constante à la chaleur spécifique à volume constant (5/3 pour les gaz monoatomiques, 7/5 pour les diatomiques et environ 1 pour les multiatomiques), λ_{1Pa} est le libre parcours moyen à 1 Pa pour la température donnée, α est le coefficient d'accommodation des gaz (plus petit ou égal à 1, 0.8 pour l'azote et 0.9 pour l'oxygène [10]) et d_{GAP} est la distance entre les deux surfaces.

Pour l'air, on relie la pression et le libre parcours moyen, à 300K, selon :

$$\lambda \cdot p = 50\mu m \cdot torr = 6.5mm \cdot Pa = 0.065\mu m \cdot atm \quad (2.4)$$

Un espacement entre les surfaces de 1 μ m correspond à une pression de transition de 0.2atm environ, et un libre parcours moyen de même taille à une pression de 0.065atm pour un nombre de Knudsen de 1. En utilisant au maximum le potentiel du régime de transition, un capteur de type Pirani avec un tel espacement de 1 μ m pourra encore indiquer une variation de la conductivité thermique jusqu'à deux ordres de grandeur de pression de plus environ, soit jusqu'à plus que la pression atmosphérique. La distance entre les parois détermine donc la pression maximale mesurable par un tel capteur. Cependant, il faut aussi s'assurer qu'en cours d'opération, la distance entre les parois ne varie pas trop. La conduction thermique étant

essentiellement déterminée par la pression et cette distance, une variation de la hauteur de la membrane chauffée se traduit immédiatement par un changement dans la mesure.

Le procédé de fabrication et les dimensions de la membrane doivent être choisis tels que les variations dans la distance entre la membrane et le substrat ne varie pas énormément d'un capteur à l'autre. Autrement, la performance des capteurs sera trop directement reliée à la qualité de la fabrication : le design ne sera pas robuste.

L'espacement minimal entre les surfaces n'est pas le seul besoin du capteur thermique de pression. En effet, il est aussi avantageux que la conduction autre que dans le gaz entre les deux parois soit minimisée. En effet, la pression mesurable la plus basse est essentiellement déterminée par la pression pour laquelle la conduction autre que dans les gaz domine la conduction dans le gaz. Il faut donc maximiser l'isolation thermique du capteur.

En conclusion, l'isolation thermique et un espacement membrane à substrat minimum sont les deux conceptions de design les plus importantes pour un capteur thermique de pression. De plus, il faut s'assurer que la distance membrane à substrat varie peu d'un dispositif à un autre et en cours d'opération.

2.1.2 Le capteur de gaz à base de couche sensible

Les capteurs de gaz à base de couche sensible ne sont pas des capteurs thermiques en soi. Ce sont des capteurs qui sont faits d'une couche sensible dont une propriété, la résistivité par exemple, change en fonction de la concentration d'un ou de plusieurs gaz [5, 8, 11]. Pour ces capteurs, afin d'obtenir la meilleure sensibilité ou sélectivité de la couche, il faut souvent

chauffer un capteur à une température élevée. La structure suspendue sert alors de plaque chauffante [12, 13, 14]. Par exemple, pour s'affranchir de l'humidité, certains capteurs sont opérés quelques degrés au-dessus de 100°C.

Pour de tels capteurs, l'isolation thermique est un facteur de conception essentiel : meilleure est l'isolation, moins le capteur consomme d'énergie en opération.

Toutefois, une difficulté importante de la fabrication des capteurs de gaz vient du dépôt et de la mise en forme de la couche sensible. La couche, sensible aux produits chimiques par nature, est souvent fragile face aux solvants, acides et bases utilisés dans la fabrication des membranes ou dans la mise en forme des couches.

Il faut faire le dépôt de la couche sensible après la mise en forme de la membrane parce que les produits chimiques qui libèrent la membrane sont fort corrosifs. Par exemple, un groupe a proposé de déposer la couche par vapeurs chimiques (CVD), en chauffant la membrane à l'aide de son élément chauffant [12, 13]. Cette technique est idéale, car elle ne nécessite aucune étape de fabrication après le dépôt de la couche qui viendrait en altérer les propriétés. Le dépôt par CVD n'est toutefois pas possible pour toutes les couches sensibles.

En bref, outre l'isolation thermique, il faut considérer la facilité du dépôt et de la mise en forme des couches sensibles après la libération de la membrane, dans le cas des capteurs de gaz. La température que peut atteindre la couche avec l'élément chauffant doit aussi être suffisante pour le capteur de gaz donné.

2.1.3 Le capteur de tension moyenne d'un signal variable

Le capteur de tension moyenne rms est en fait un thermomètre qui mesure la puissance thermique dissipée par un signal dans une résistance. À résistance constante, la puissance thermique libérée dans la résistance est directement proportionnelle à la tension moyenne rms [15, 16, 17].

$$P = \frac{1}{R} \frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt = \frac{v_{RMS}^2}{R} \quad (2.5)$$

Il s'agit donc de placer une résistance électrique sur la membrane dans laquelle le signal dissipe de la chaleur et de mesurer la température atteinte.

Dans le cas du capteur de tension moyenne rms, d'un point de vue thermique, l'isolation est la principale considération de design, car elle détermine la sensibilité du convertisseur de signal variable à continu.

2.1.4 Le capteur infrarouge

Le capteur infrarouge est en fait un amalgame des deux capteurs précédents, à ceci près qu'il ne nécessite pas de chauffage. Le capteur infrarouge mesure la puissance radiative absorbée par une couche sensible sur la membrane [18, 19, 20, 21]. Pour ce faire, on dépose souvent une couche absorbante pour la gamme de longueur d'ondes désirée.

Ici aussi, l'isolation thermique est une importante considération de design, car elle détermine la sensibilité du capteur. Toutefois, le procédé de fabrication doit être tel que la couche sensible peut être facilement déposée et mise en forme.

2.2 Analyse des designs de capteurs thermiques : motivations et limitations des outils actuels

Dans la littérature, l'analyse des dispositifs thermiques se limite souvent aux considérations thermiques, c'est-à-dire à la résistance thermique du dispositif. Il est vrai que ce paramètre est le plus important pour juger de la qualité de plusieurs dispositifs. Toutefois, les besoins spécifiques des capteurs qui ont mené à ce document ainsi que les travaux théoriques et les efforts de fabrication dont il a été l'objet ont montré que d'autres facteurs étaient aussi très importants, non seulement en termes de qualité, mais aussi de fiabilité et de facilité (et même possibilité) de fabrication.

En effet, les contraintes mécaniques internes sont souvent assez importantes pour déformer une membrane suspendue de quelques microns vers le haut ou le bas. Cette même membrane, en cours d'opération, est chauffée. Les différences de coefficient d'expansion thermique entraînent des contraintes qui peuvent déformer la membrane à leur tour. Enfin, la petite distance entre la membrane suspendue et le substrat peut amener des contraintes dues aux forces électrostatiques entre les surfaces. Bref, un capteur thermique est un dispositif fait d'une structure "mécanique" "chauffée" "électriquement". Ces exemples montrent que l'analyse d'un capteur thermique doit

dépasser les considérations thermiques et doit même considérer le couplage entre les domaines mécanique, thermique et électrique.

Il est facile de voir qu'il est impossible de construire un système d'équations analytiques qui considère les trois domaines physiques simultanément pour un design donné. La géométrie d'un capteur est trop complexe.

Les logiciels d'analyse par éléments finis et par différences finies sont des outils souvent utilisés pour pallier l'impossibilité de bâtir un système d'équations analytiques total. Ces logiciels résolvent les équations analytiques localement et s'appliquent donc à une grande majorité des géométries de design possibles. Un logiciel comme Ansys a pu être utilisé par l'auteur. Un tel logiciel est difficile à utiliser pour une structure MEMS complexe. En effet, les grandes variations dans les rapports d'aspect entre les longueurs, largeurs et épaisseurs des couches font en sorte que les éléments possibles s'adaptent mal au design. Il ne faut pas oublier qu'une membrane 300 fois plus longue qu'épaisse n'est pas exceptionnelle. Le nombre d'éléments atteint rapidement des proportions gigantesques.

Depuis quelques années, des logiciels comme IntelliCad et MicroCosm ont fait leur apparition dans le domaine des MEMS. Cependant, ils ne sont présentement bien adaptés qu'aux dispositifs les plus en vogue à l'heure actuelle : les structures mécaniques des capteurs de pression piézorésistifs, les accéléromètres et les autres dispositifs faits d'une structure de polysilicium suspendue. L'auteur a pu avoir une expérience directe du premier logiciel. Il est à noter que certains groupes de recherche développent leurs propres outils [22] et on peut espérer que des outils adaptés aux capteurs thermiques verront le jour dans un avenir rapproché.

Il faut aussi noter que dans les deux cas, tant les équations analytiques totales et les logiciels de calcul, les résultats obtenus sont sujets à interprétation. En effet, les propriétés physiques (module d'Young, etc.) et les conditions aux frontières (géométrie de l'attache de la membrane au substrat) sont au mieux méconnues, au pire inconnues, au moment de l'analyse.

De plus, ces outils prennent un long temps de simulation. Pour une analyse exploratoire, alors que l'on veut rapidement étudier différentes géométries et de multiples concepts de designs, ces outils ne sont pas particulièrement adaptés.

C'est pourquoi, au cours de ce mémoire, un ensemble d'outils simples d'analyse a été développé ou adapté d'autres domaines (comme le monde macroscopique, par exemple) pour étudier les incidences thermiques, mécaniques et électriques sur les designs. Plus encore, des analyses couplées ont été élaborées, comme les analyses thermoélectriques, thermomécaniques, électromécaniques, etc. Plusieurs des équations, de même que leur rassemblement en un seul bloc, sont présentés pour la première fois ici.

Notre objectif a été de concentrer nos efforts, surtout ici dans ce mémoire, dans le développement d'analyses plus simples, de «règles du pouce» qui permettent de dégager plus facilement les tendances, limites et contraintes dans le design de structures thermiques.

Pour toutes les analyses présentées ici, la structure type sous étude est présentée à la figure 2.1.

2.3 *Considérations thermiques*

Puisqu'il est sujet de capteurs thermiques, on ne s'étonnera pas de s'intéresser d'abord aux phénomènes thermiques qui entourent les capteurs. Le transport de chaleur dans le dispositif est à la base de leur comportement utile.

L'équation fondamentale de transport de la chaleur est la suivante :

$$k\nabla T + q_{TH} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.6)$$

Dans cette expression, k est la conductivité thermique du matériau, T est la température, q est la puissance thermique (par unité de volume) donnée ou retirée du matériau, ρ est la masse volumique, C_p est la capacité thermique du matériau (par masse).

Le terme de droite de cette équation exprime la diffusion de la chaleur. On y retrouve la dérivée partielle de la température dans le temps, ainsi que la capacité thermique ρC_p , c'est-à-dire la résistance au changement de température dans le temps. Le second terme de gauche, q_{TH} , exprime la puissance thermique gagnée ou perdue par le matériau. On inclut dans ce terme le chauffage externe et interne (effet Joule, absorption de radiations, etc.), ainsi que le transport de chaleur par radiation et par convection. Le premier terme concerne la conduction de la chaleur dans le matériau, fonction de la conductivité thermique k du matériau.

La figure 2.2 illustre les différents modes de transport de chaleur dans une structure type.

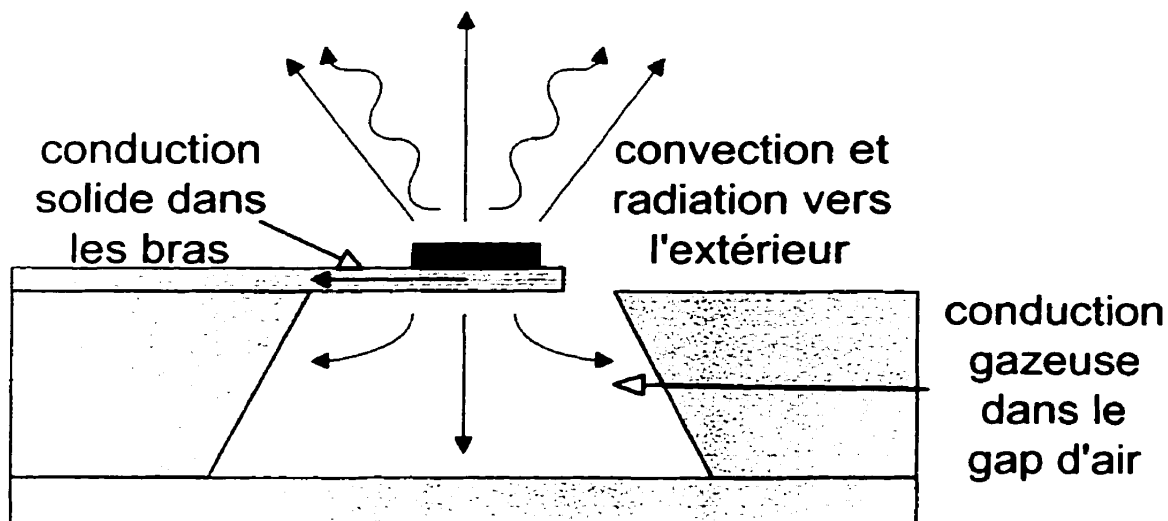


Figure 2.2 Modes de transport de chaleur dans un capteur type

2.3.1 Conduction

La conduction thermique est le transport de la chaleur dans les solides, ainsi que dans les fluides s'il ne s'accompagne pas d'un mouvement de masse.

La conduction est régie par

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.7)$$

Dans cette équation, q est le flux thermique (par unité de surface), T la température et k représente la conductivité thermique du matériau. Le signe négatif montre que la chaleur s'écoule d'une partie plus chaude à une partie plus froide.

Afin de faire le parallèle avec un équivalent électrique, on peut déterminer une conductance thermique G_{TH} . Ainsi, en prenant compte de toutes les conductances thermiques et connaissant la puissance électrique absorbée, on peut connaître la température atteinte en un point, de la même façon que la connaissance du réseau de résistances et des courants permet de calculer la tension en tout point. L'équivalent du courant est la puissance thermique et celui de la tension est la température atteinte. Tout comme la tension, la température atteinte est toujours par rapport à une référence.

Enfin, la conductance thermique entre deux points espacés d'une distance l et avec une surface A (largeur w et épaisseur e) est égale à :

$$G_{TH} = \left| \frac{\Delta T}{q \cdot l} \cdot A \right| = k \frac{we}{l} \quad (2.8)$$

Il est important de noter ici que les calculs de transport de chaleur considèrent habituellement que la membrane est à une température constante par rapport au substrat. Les gradients de température se trouvent presque exclusivement dans l'air et dans les bras qui supportent la membrane. Ceci vient du fait que les membranes sont habituellement recouvertes totalement de métal et que le métal est un excellent conducteur de chaleur. La validité de cette hypothèse a été confirmée par différentes simulations par éléments finis ou différences finies [14, 23, 24].

Dans le cas d'une structure multicouche comme à la figure 2.2, tout comme pour l'équivalent électrique, on additionne les conductances des différentes couches i en parallèle :

$$G_{TH.TOTAL} = \sum_i k_i \frac{w_i e_i}{l_i} \quad (2.9)$$

Dans les solides, la chaleur, comme l'électricité, s'écoule mieux dans les métaux que les isolants amorphes (deux ordres de grandeur peuvent les séparer). Toutefois, dans les cristaux, la chaleur se propage bien par les phonons et on peut trouver des isolants cristallins très bons conducteurs de chaleur, comme le diamant.

Dans les gaz, le transport se fait par diffusion : les molécules se réchauffent au contact de surfaces chaudes et donnent leur énergie aux surfaces plus froides. Les gaz ont aussi une résistivité thermique et elle est beaucoup plus élevée que celle des isolants, de deux ordres de grandeur environ. Enfin, la conductivité thermique des gaz diminue proportionnellement à la pression lorsque la distance entre deux surfaces devient comparable ou plus petite que le libre parcours moyen.

Le tableau 2.1 exprime la conductivité de certains solides et gaz.

Tableau 2. 1 Conductivité thermique de matériaux de la microélectronique et divers

Matériau	Conductivité thermique (W/m K)	Matériau	Conductivité thermique (W/m K)
Silicium	100-150	Aluminium	250
Oxyde de silicium	1-2	Nitride de silicium	23
Platine	72	Cuivre	401
Air (TPN)	0.025	Eau	0.56

(Références : [25, 26, 27])

Afin de fixer quelques nombres, voici quelques estimations de conduction thermique dans une structure typique, une structure à membrane trouée, c'est-à-dire une structure comme on peut le voir à la figure 2.1, à la page 14, mais sur laquelle on troue la membrane sur deux ou trois des côtés qui entourent le capteur, de façon à limiter la conduction de la chaleur dans la membrane :

- Distance de 100µm entre le point d'ancrage au substrat et la région chauffée
- Distance de 100µm entre la région chauffée et le substrat dans l'air
- Région chauffée de 100µm par 100µm
- Entre la région chauffée et l'ancre au substrat, deux fils d'aluminium de 1µm d'épais et 2µm de large, sur une plaque d'oxyde de silicium de 25µm de côté et de 2µm d'épais.

$$\begin{aligned}
G_{TH.TOTAL} &= \sum_i k_i \frac{w_i e_i}{l_i} = G_{MÉTAL} + G_{DIÉLECTRIQUE} + G_{AIR} \\
&= 2 \cdot 250W / mK \cdot 1\mu m \cdot 2\mu m / 100\mu m \\
&\quad + 1W / mK \cdot 2\mu m \cdot 25\mu m / 25\mu m \\
&\quad + 0,025W / mK \cdot ((100\mu m)^2 / 100\mu m + 4 \cdot (25\mu m)^2 / 100\mu m) \\
&= (10 + 2 + 3,2)\mu W / K = 15,2\mu W / K
\end{aligned} \tag{2.10}$$

On remarque que la contribution majoritaire vient de la conduction dans les bras, dans la partie métallique surtout. Comme la largeur des lignes est souvent déterminée par le procédé de fabrication commercial même, on pourrait la réduire en allongeant les bras. On réduit ensuite la contribution de l'oxyde et de l'air en diminuant la largeur des bras et la surface de la membrane.

2.3.2 Convection

La convection libre est un phénomène de transport de chaleur complexe qui est relié aux mouvements de masse dans un fluide lorsqu'un fluide plus chaud et donc moins dense (moins lourd) se trouve sous un fluide plus dense (plus lourd). La convection forcée est un échange de chaleur avec un fluide qui s'écoule au-dessus d'une surface.

Les quatre applications de capteurs qui nous intéressent ici sont opérées sous vide ou dans un fluide stationnaire. On laissera donc de côté l'étude de la convection forcée. Néanmoins, il est à noter que des dispositifs thermiques semblables à ceux qui font l'objet de ce mémoire sont utilisés pour mesurer des débits de gaz [23, 28].

Quant à la convection libre, il y a lieu de se poser la question sur sa réelle présence dans les petites structures à membrane suspendue qui nous intéressent. Deux nombres sont souvent

utilisés afin de juger de la prédominance ou non de la conduction thermique sur la convection libre entre deux surfaces. Les nombres de Grashof et Rayleigh mesurent tous deux le ratio de la force qui tend à amener le fluide plus dense vers le haut à la viscosité du fluide [29]. Leur expression numérique est semblable :

$$Gr = \frac{g\beta L^3 \cdot dT}{\nu^2} \quad (2.11)$$

$$Ra = \frac{g\beta L^3 \cdot dT}{\alpha \nu} \quad (2.12)$$

Pour un gaz idéal, β est égal à l'inverse de la température absolue, g est l'accélération gravitationnelle, ν est la viscosité cinématique du fluide ($15,89 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ à 300K et $26,41 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ à 400K pour l'air) et α est la diffusivité thermique ($22,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ à 300K et $38,3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ à 400K pour l'air) [29]. On considère que la conduction domine si le nombre de Grashof est inférieur à 2000 ou le nombre de Rayleigh inférieur à 1708 [29]. Dans les deux cas, en prenant une distance aussi grande que 1mm entre deux parois et une différence de température de 100K à partir de 300K, les deux nombres ne dépassent pas 100. La convection libre est donc négligeable entre une membrane suspendue et le substrat. De la même façon, la convection dans l'air avec le couvercle du boîtier du dispositif est plus souvent qu'autrement négligeable face à la conduction, puisqu'ils sont souvent à moins d'un millimètre du substrat. Dans un design typique celui de la figure 2.1, la convection libre peut donc être négligée au profit de la conduction dans le gaz.

De façon pratique, certains ont mesuré la conductivité thermique totale de sa membrane suspendue placée horizontalement, tête vers le haut et tête vers le bas, et verticalement et n'ont pas mesuré de différence [25, 30].

2.3.3 Radiation

Le troisième mode de transfert de chaleur, la radiation, consiste en l'émission et l'absorption de photons entre deux surfaces de températures différentes. Le flux de chaleur émis par une surface est donné par l'équation suivante :

$$q = \epsilon \sigma A T^4 \quad (2.13)$$

Dans cette expression, ϵ est l'émissivité de la surface (1 pour un corps noir, sinon inférieur à 1), σ est la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$), A est la surface émettrice et T la température de la surface.

La résistance thermique équivalente entre deux surfaces (en supposant une absorption totale) est donc :

$$G_{RAD} = \frac{dq}{dT} = 4\epsilon\sigma T^3 \quad (2.14)$$

Tout au plus, en prenant une émissivité maximale de 1, une différence de température de 100K entre la membrane et le substrat (à température normale de 300K), une membrane de 200um de

côté, la conductance thermique équivalente est de l'ordre de $0,1 \times 10^{-6} \text{ W/m K}$, ce qui est faible face à la conduction thermique typique dans le dispositif. La radiation doit cependant être considérée si la différence de température atteint quelques centaines de degrés.

2.3.4 Conduction totale et expressions unificatrices

a) Sous vide

Sous vide, les seuls modes de transport actifs sont la conduction et la radiation. De ces deux modes, la radiation peut souvent être négligée pour les températures qui nous intéressent. On reprend alors l'équation de conduction dans les bras de la membrane pour la conduction totale.

$$G_{TH.TOT.AL.VIDE} = \sum_i k_i \frac{w_i e_i}{l_i} \quad (2.15)$$

b) Dans l'air

Si on doit considérer le fluide ambiant et la radiation, la chaleur dissipée dans le bras ne se fait plus uniquement dans le solide, mais aussi vers le substrat ou le boîtier par conduction dans le gaz ou par radiation.

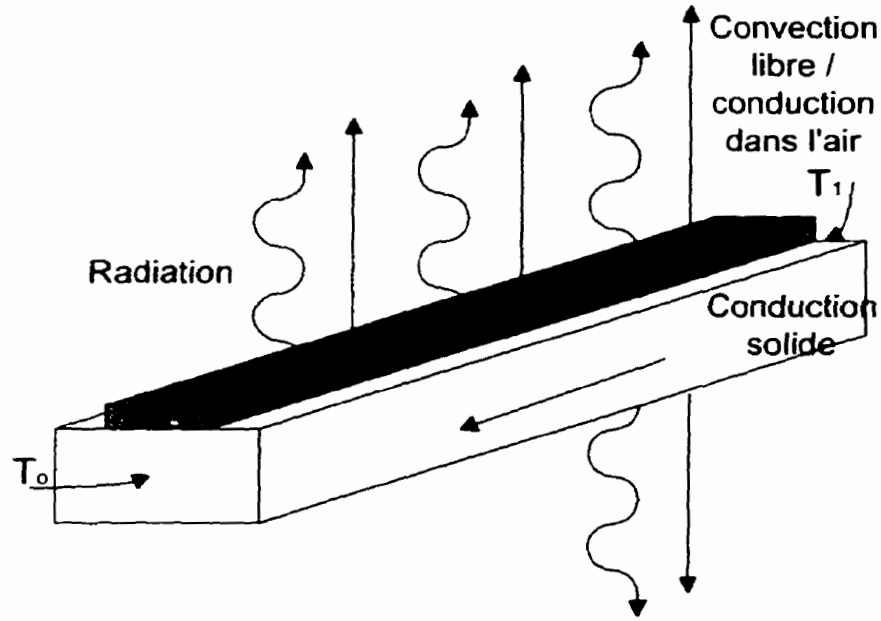


Figure 2.3 Modes de transport de chaleur dans un bras dans l'air

On obtient la conductance d'un bras dans ces conditions de la façon suivante. La figure 2.3 montre les modes de transport dans un bras dans l'air. On considère d'abord l'équation de transport de chaleur dans une seule dimension, le long d'un bras, en mode statique.

$$k_{BRAS} \frac{d^2(T - T_{SUB})}{dx^2} + q = 0 \quad (2.16)$$

$$Aek_{BRAS} \frac{d^2(T - T_{SUB})}{dx^2} - \epsilon \sigma A (T^4 - T_{SUB}^4) - \frac{k_{AIR} A}{d_{GAP}} = 0 \quad (2.17)$$

Dans ces expressions, A est la surface de la membrane ($A = w/l$), e est l'épaisseur de la membrane, T est la température de la membrane et T_{SUB} est la température du substrat. Si le bras est fait de

plusieurs couches, on peut calculer $k_{BR,IS}$ en faisant la somme pondérée des conductivités dans le bras :

$$k_{BR,IS} = \frac{G_{BR,IS,VIDE}}{\frac{w_{BR,IS} e_{BR,IS}}{l_{BR,IS}}} = \frac{l_{BR,IS}}{w_{BR,IS} e_{BR,IS}} \sum_{i \text{ matériaux}} \frac{k_i w_i e_i}{l_i} \quad (2.18)$$

La distance entre le bras et le substrat dans l'air est représentée par d_{GAP} . Or, on peut simplifier $(T' - T_{SUB})^4$ par $4T_{SUB}^3(T - T_{SUB})$ si la température atteinte est faible $(T - T_{SUB})/T_{SUB} \ll 1$.

$$\frac{d^2(T - T_{SUB})}{dx^2} - \frac{1}{ek_{BR,IS}} \left(\epsilon \sigma T_{SUB}^3 + \frac{k_{AIR}}{d_{GAP}} \right) (T - T_{SUB}) = 0 \quad (2.19)$$

En solutionnant cette équation différentielle et en prenant les conditions aux frontières selon lesquelles la température atteint T_M à la membrane ($x = l$) et T_{SUB} au substrat ($x = 0$), on obtient :

$$T(x) - T_{SUB} = (T_M - T_{SUB}) \frac{\sinh(Kx)}{\sinh(Kl)} \quad (2.20)$$

$$\text{où } K = \sqrt{\frac{1}{ek_{BR,IS}} \left(\epsilon \sigma T_{SUB}^3 + \frac{k_{AIR}}{d_{GAP}} \right)} \quad (2.21)$$

Le flux de chaleur entrant dans la membrane est [31] :

$$q = k_{BR,IS} \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=l} = k_{BR,IS} K (T_M - T_{SUB}) \coth(Kl) \quad (2.22)$$

On obtient alors la conduction thermique entre la membrane et le substrat.

$$G_{BRAS..AIR} = \frac{q}{\Delta T} \cdot A = \frac{q \cdot A}{T_M - T_{SUB}} = w_{BR,1S} e_{BR,1S} k_{BR,1S} K \cosh(Kl) \quad (2.23)$$

$$G_{BRAS..AIR} = \frac{w_{AIR} e_{AIR} k_{BR,1S}}{l_{BR,1S}} Kl \coth(Kl) \quad (2.24)$$

$$G_{BRAS..AIR} = G_{BRAS..VIDE} \alpha \cdot \coth(\alpha) \quad (2.25)$$

$$\text{où } \alpha = Kl = \sqrt{\frac{l^2}{ek_{BR,1S}} \left(\epsilon \sigma T_{SUB}^3 + \frac{k_{AIR}}{d_{GAP}} \right)} = \sqrt{\frac{(\epsilon \sigma T_{SUB}^3 + \frac{k_{AIR}}{d_{GAP}}) \cdot A}{G_{BRAS..VIDE}}} \quad (2.26)$$

On remarque que le terme α est en fait la racine du rapport de la conductance thermique dans l'air à celle dans le bras. Si la conductance dans l'air est grande, la conduction est alors proportionnelle à α . Si la conductance dans les bras domine, α est petit et $\alpha \coth(\alpha)$ tend vers 1. La conductance thermique totale s'obtient en additionnant la conductance des bras à la conductance entre la membrane et le substrat dans l'air.

Les équations 2.25 et 2.26 sont présentées ici pour la première fois. Elles sont importantes car elles donnent en un coup d'œil la différence dans la conductance entre le vide et l'air pour les bras. L'influence des différents paramètres géométriques peut être rapidement évaluée.

2.3.5 Analogie électrique et intégration dans un circuit électrique

Les sections précédentes ont montré que l'on pouvait réduire les différents modes de conduction de la chaleur à des conductances thermiques. De la même façon, on peut calculer la capacité thermique des différents matériaux utilisés, dans le cas d'une analyse dynamique.

Étant donné l'équivalence des domaines thermique et électrique, plusieurs chercheurs profitent des outils de simulation électrique pour simuler leur circuit électrique. Mieux encore, un capteur complet peut être simulé à partir des deux réseaux parallèles, électrique et thermique, simultanément. Il s'agit de diviser le capteur en petits volumes distincts et de considérer les différentes résistances thermiques entre un volume et ses voisins. Si un volume en particulier est chauffé par effet Joule ou par absorption de lumière, une source de courant à ce point simule la puissance thermique émise. La "tension" générée par les sources de courant (les sources de puissance thermique) et les résistances thermiques constitue la température. La figure 2.4 illustre un volume et les différents éléments du réseau thermique relatifs à ce volume [25, 32, 33].

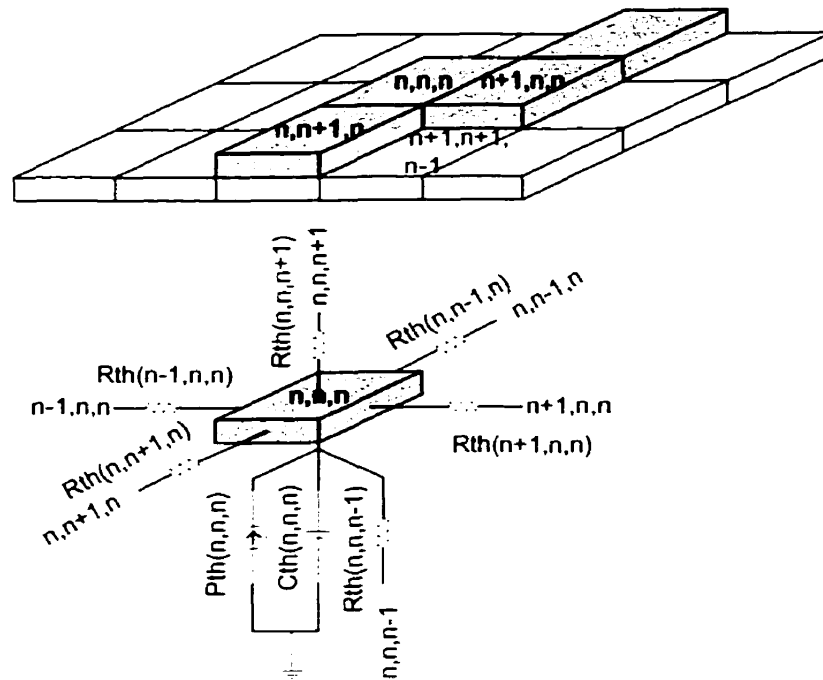


Figure 2.4 Volume type utilisé pour la simulation thermique avec le logiciel de simulation de circuits électroniques SPICE.

2.4 Considérations mécaniques

Une membrane suspendue est une structure mécanique : un bon design est donc un design robuste face aux variations mécaniques dues au procédé. Une membrane est soumise aux contraintes résiduelles induites par le procédé de fabrication. De plus, les valeurs des paramètres comme le module d'Young sont à la fois dépendantes du procédé utilisé et leur connaissance précise est rendue difficile par leur nature de couche mince (différentes méthodes donnent des valeurs différentes [34, 35]). Enfin, selon les procédés, et surtout dans les procédés

commerciaux de microélectronique, les épaisseurs des couches peuvent être très différentes des valeurs nominales (20% d'erreur et même plus) [36].

Il est d'abord pertinent de se demander si les contraintes résiduelles peuvent avoir un effet sur un dispositif, car très peu de publications en font mention. Si les contraintes tensiles sont trop élevées, des brisures peuvent se produire : les matériaux ne peuvent supporter qu'une certaine elongation (yield strain). Des contraintes compressives trop grandes provoqueront un mouvement dans la membrane, le flambage (buckling). Au tableau 2.2, quelques valeurs de contraintes résiduelles de procédés standard sont données.

Tableau 2.2 Contraintes résiduelles dans des couches minces déposées dans un procédé de microélectronique commercial

Propriété	SiN _x LPCVD	SiO _x contact * (LPCVD)	SiO _x via • (PECVD)	SiN _x PECVD passivation *
Contrainte σ	1000 $\pm$ 30 MPa	-40 $\pm$ 10 MPa	37 $\pm$ 6 MPa	82 $\pm$ 6 MPa
Module d'Young E	195 $\pm$ 6 GPa	20 $\pm$ 10 GPa	65 $\pm$ 5 GPa	92 $\pm$ 2 GPa
Élongation ϵ	0.5%	0.2%	0.05%	0.1%

Référence: [37].

* L'oxyde de silicium de contact réfère à l'oxyde déposé entre la dernière couche de polysilicium et la première couche de métal dans un procédé commercial. L'oxyde de silicium de via réfère à l'oxyde d'isolation électrique déposé entre les couches de métal. Le diélectrique de passivation est la couche protectrice déposée à la fin du procédé.

Il est difficile d'estimer l'élévation ou la dépression d'un pont ou d'une membrane en fonction des contraintes résiduelles. La principale difficulté consiste à trouver une bonne forme pour l'équation représentant la déformation le long du pont et surtout de l'imprécision des conditions aux frontières [38, 39, 40, 41].

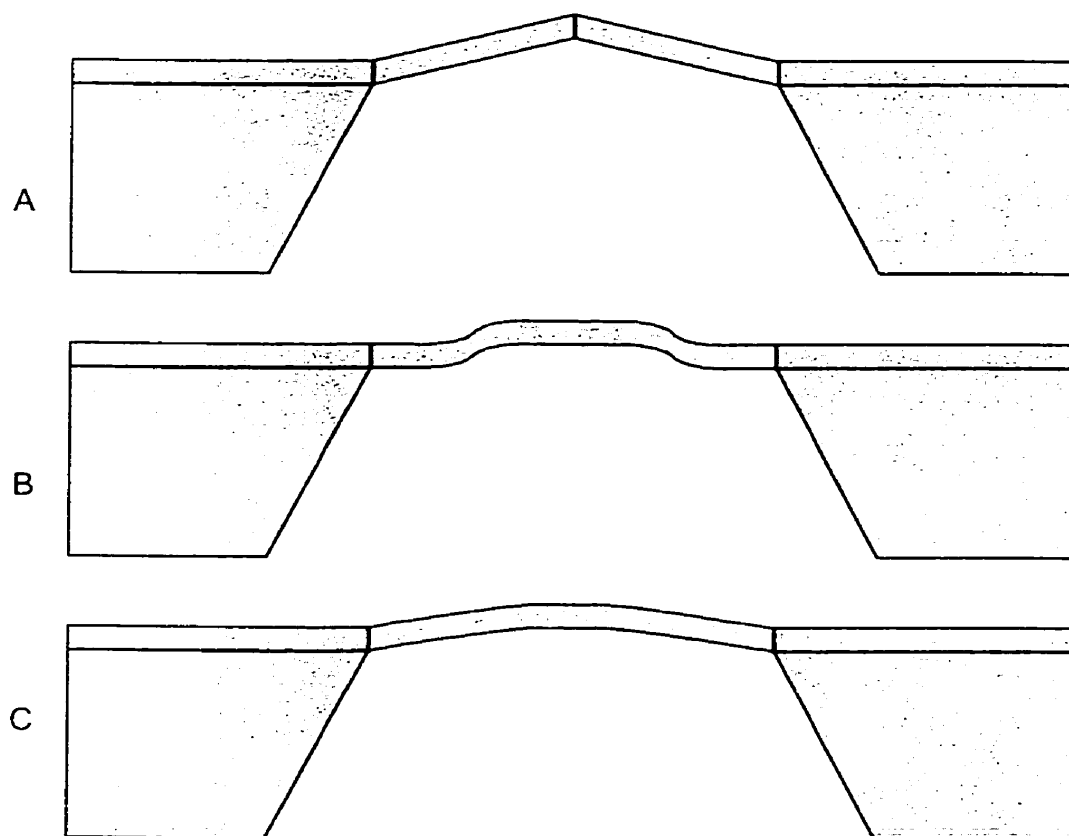


Figure 2.5 Élévation d'un pont ou d'une membrane suite à des contraintes résiduelles dans une couche. A) Forme triangulaire. B) Forme de cosinus de déformation et de dérivée de déformation nulle aux extrémités. C) Forme d'arc de cercle.

Pour donner une idée de l'ordre de grandeur de l'élévation ou la dépression h d'un pont de longueur l due à une elongation élastique ϵ dans un matériau, on peut supposer que le pont est partagé selon deux triangles de longueur égale, comme à la figure 2.5a. On obtient alors l'expression suivante :

$$h = \frac{\sqrt{\epsilon}}{\sqrt{2}} l \quad (2.27)$$

Certains considèrent que la forme de la déformation suit un cosinus et considèrent que la déformation et sa dérivée sont nulles aux extrémités, comme à la figure 2.5b. Dans un tel cas, l'élévation ou la dépression h d'un pont de longueur l est reliée à l'élongation ϵ par :

$$h = \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sqrt{\epsilon} l \quad (2.28)$$

Par contre, étant donné la minceur des couches en comparaison avec la longueur des ponts et membranes, ces conditions aux frontières ne sont pas toujours valides. La figure 2.5c présente un tel cas. Aussi, dans la mesure des contraintes par la méthode de l'application de pression sur une membrane, on utilise la relation suivante [42] :

$$h = \frac{3.41\sqrt{\epsilon}}{2.45} l \quad (2.29)$$

En bref, nous pouvons estimer que l'élévation due aux contraintes résiduelles dans les ponts et membranes est de l'ordre de :

$$h \approx \sqrt{\epsilon} \cdot l \quad (2.30)$$

On voit que pour une contrainte résiduelle telle que l'élongation atteint 0,1%, l'élévation peut facilement atteindre 3% de la longueur, soit 6µm pour un pont de 200µm ! Une élongation compressive de 0,01% entraînerait tout de même une élévation de 1%. Le tableau 2.2 affiche

des élongations variant entre 0,05% et 0,5% ! Les contraintes résiduelles ne sont donc pas du tout négligeables.

Si la membrane est en tension, l'élévation disparaît. Par contre, si la tension est trop grande, la structure peut se fendre. Le tableau 2.4 présente l'élongation maximale avant brisure (yield strain) pour différents matériaux de la microélectronique :

Tableau 2.3 Propriétés mécaniques de différents matériaux de la microélectronique

Matériau	Module d'Young (GPa)	Coefficient d'expansion thermique	Élongation maximale avant brisure (10^{-3})
Aluminium	70	25	2
Oxyde de silicium	75	0,55	112
Nitrure de silicium	380	2,5	37
Silicium	180	3	28
Titane	110	11	4
Platine	170	9	1
Tungstène	410	4,5	10

Référence: (tiré de [43, 44, 45]). Note : Tous ces matériaux ne sont pas purs. Par exemple, on ajoute souvent une faible proportion de silicium et de cuivre dans l'aluminium.

Lorsque le pont ou la membrane est fait de plus d'une couche, le calcul devient évidemment plus compliqué. Une solution simple est de calculer une contrainte résiduelle pondérée et d'appliquer les relations développées ci-dessus. Le groupe de ETH Zürich propose la relation suivante [46] :

$$\sigma \approx \frac{1}{e_{\text{tot}} \sum_{i, \text{matériaux}}} \sigma_i e_i \quad (2.31)$$

La notion de contrainte résiduelle pondérée laisse supposer la possibilité de compenser les contraintes résiduelles. En effet, il est possible de déposer une couche en tension sur un empilement de couche en compression afin de limiter l'élévation due aux contraintes résiduelles [47]. Par contre, une contrainte résiduelle pondérée nulle n'est pas un gage d'élévation nulle. Dans une structure à deux couches, par exemple, si l'une des couches est en compression, une élévation se produira. C'est même le principe des bilames thermomécaniques dont il sera question à la section suivante.

Dans un bilame thermomécanique, on retrouve deux couches de contrainte nulle initialement par hypothèse. Un chauffage ou un refroidissement entraînerait une élongation $\varepsilon = \alpha \Delta T$ dans chacun des matériaux, si ce n'était de la présence de l'autre. Dans cette équation, α est le coefficient d'expansion thermique du matériau et ΔT la différence entre la température actuelle et la température initiale. Le bilame se courbe de façon à faire un compromis en mettant en compression le matériau qui veut prendre la plus grande expansion et en mettant en tension l'autre matériau. L'elongation thermique se fait dans les trois dimensions, alors que les contraintes résiduelles sont habituellement situées dans le plan de la couche. Étant donné le rapport d'aspect important entre l'épaisseur de la couche et sa surface, on peut remplacer le

terme d'expansion thermique $\varepsilon = \alpha \Delta T$ par la contrainte résiduelle $\varepsilon = \sigma_{RESIDUEL} / E$ (on néglige alors l'expansion perpendiculaire au plan de la couche). L'équation du rayon de courbure [44] peut alors être utilisée (voir section suivante).

Les contraintes dans les couches ne sont habituellement pas bien connues pour les procédés CMOS commerciaux. Plus encore, les différentes couches sont souvent faites de plusieurs couches elles-mêmes, ceci pour limiter les contraintes mécaniques dans les couches et éviter les bris.

Bref, toutes ces inconnues ont pour effet d'entraîner la méfiance sur la précision des résultats de simulations informatiques (par éléments finis, par exemple) sur des membranes déformées. Les expériences de l'auteur avec le logiciel Ansys ont montré que différentes conditions aux frontières réalistes résultent en des différences d'élévation dépassant 100% !

Les déformations dues aux contraintes résiduelles sont donc un élément majeur dans le design d'un capteur et de son procédé de fabrication. Par exemple, au laboratoire, nous avons été à même d'observer que des membranes se détachent tout simplement de leurs ancrages au substrat lorsque les contraintes sont trop élevées, ne laissant derrière elle qu'une cavité. La figure 2.6 montre des lignes de métal qui se détachent du substrat dans le procédé Mitel 1.5 μ m.



Figure 2.6 Micrographie MEB d'une partie d'un circuit obtenu à l'aide d'un procédé CMOS commercial présentant le détachement du substrat de couches de diélectrique après gravure de la couche d'aluminium qu'elles recouvraient.

Deux solutions principales ont été proposées pour résoudre ce problème : l'emploi de couches de compensation ou le développement d'un procédé dédié. Le groupe de ETH Zurich préconise le dépôt d'une couche légèrement en tension au-dessus de la structure sur des membranes fermées (sans bras), et obtiennent des déflexions inférieures à $0.1\mu\text{m}$ avec un rendement élevé [47]. Une couche de contrainte trop tensile entraînerait des brisures dans la membrane. Le groupe de Taiwan préfère développer ses propres couches avec des contraintes les plus faibles possibles [48]. L'auteur s'est intéressé à ces avenues en cherchant à développer des couches de nitrure de silicium de contrainte presque nulle à l'aide d'un système de plasma à résonance

électronique cyclotronique (ECR), avec des dépôts à température de la pièce [49]. Les résultats de ces travaux dépassent le cadre de ce mémoire et ne sont pas discutés ici.

Il est aussi possible de réduire l'impact de ce problème en n'attachant la structure que d'un côté, en porte-à-faux [50].

Dans tous les cas, l'objectif doit être la robustesse du design afin que la structure existe toujours après sa libération et qu'ensuite son éventuel mouvement ait un impact négligeable sur le comportement du dispositif en opération.

En ce qui concerne la gravité, enfin, elle est négligeable. Une membrane de quelques microns d'épais exerce une pression gravitationnelle équivalente de moins d'un Pascal typiquement.

2.5 Analyse thermomécanique

L'analyse thermomécanique est en fait une analyse de déformation mécanique causée par un changement de température induite par le chauffage ou le refroidissement. De plus, une membrane est habituellement formée de plusieurs couches et celles-ci ont des coefficients d'expansion thermique différents. Dans le cas d'un empilement de deux couches seulement, un bilame, la différence de coefficient d'expansion thermique entraîne l'apparition d'une courbure dans le bilame. Pour le calcul du rayon de courbure pris par le bilame, deux publications proposent des expressions différentes. Les auteurs de la référence [51], plus ancienne, ne donnent pas les détails des calculs menant à leur relation. Les auteurs de la référence [52] plus récente explicitent leur résultat. Afin de départager hors de tout doute les deux publications, l'auteur a procédé à des simulations à l'aide du simulateur Ansys. Le résultat de ces travaux

montre que la référence plus récente donne la bonne expression. La valeur du rayon de courbure pour un cantilever (structure attachée à une seule extrémité), selon ces auteurs est :

$$\frac{1}{r} = \frac{3}{2} \frac{(t_1 + t_2) \Delta \alpha \Delta T}{\frac{7}{4} (t_1 + t_2)^2 - 2t_1 t_2 + (E_1 b_1 t_1^3 / E_2 b_2 t_2) + (E_2 b_2 t_2^3 / E_1 b_1 t_1)} \quad (2.32)$$

Dans cette relation, les indices 1 et 2 représentent les deux matériaux du bilame, E est le module d'Young, t est l'épaisseur de la couche et b est la largeur de la couche. Si les deux matériaux ont la même épaisseur t et la même largeur b, l'expression se résume à :

$$r = t \frac{5 + (E_1 / E_2) + (E_2 / E_1)}{3 \Delta \alpha \Delta T} \quad (2.33)$$

En supposant que la relation s'applique aux ponts (structure attachée aux deux extrémités), l'élévation d'un pont de longueur L peut être calculée avec quelques manipulations géométriques pour obtenir :

$$h = \frac{L^2}{8r} \quad (2.34)$$

Par exemple, un bilame fait d'aluminium et d'oxyde de silicium est chauffé de 100°C. Chacune de ses couches fait 1µm et il est plat à l'origine (r infini). L'extrémité d'un pont de 200µm de longueur s'élève donc à une hauteur de 4µm.

Dans un trilame fait d'une couche métallique entourée de couches d'oxydes, les déformations thermomécaniques ne sont pas totalement exclues [47]. D'abord, si les deux côtés diélectriques ne sont pas équilibrés en termes mécaniques (module d'Young, contraintes résiduelles,

épaisseur, etc.), la déformation pourra se faire sur un côté, bien que moins importante. En fait, on peut généraliser l'équation 2.32 pour un nombre de couches n avec la relation suivante [53] :

$$\frac{1}{r} = \frac{6 \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{i-1} E_i E_k t_i t_k (\gamma_i - \gamma_k) (\alpha_k - \alpha_i) \Delta T}{6 \sum_{i=1}^n \left[E_i^2 t_i^3 + \sum_{k=1}^{i-1} E_i E_k t_i t_k (t_i^2 + t_k^2 + 3(\gamma_i - \gamma_k)^2) \right]}$$

$$\text{où} \quad \gamma_i = (t_{i+1} + \dots + t_n) - (t_1 + \dots + t_{i-1}) \quad (2.35)$$

On doit aussi considérer l'élongation maximale que peut prendre un matériau, ce dont il a été question dans la section précédente. La courbe que prend un bilame lorsque chauffé peut amener l'un ou l'autre de ses constituants à dépasser son seuil de fragilité et amener la structure à garder une position particulière (le bilame ne revient plus à sa position initiale [54]). À tout le moins, en utilisant le dispositif à température constante, on limite les variations de rayon de courbure et d'élévation en cours d'opération.

2.6 Analyse thermoélectrique

Les membranes des dispositifs thermiques sont souvent chauffées par un courant électrique qui dissipe son énergie dans une résistance (effet Joule). Toutefois, le conducteur électrique, le métal, est aussi un excellent conducteur thermique. Il est donc important de rechercher la structure qui maximise la température atteinte en cours de chauffage, tout en limitant la consommation de puissance et en obtenant la plus grande sensibilité dans les structures chauffées.

Ici aussi, une contrainte physique s'impose. En ce qui concerne l'aluminium, le conducteur le plus souvent utilisé à l'heure actuelle en microélectronique, on doit limiter le courant pour éviter l'électromigration et un vieillissement rapide des dispositifs. Les fonderies commerciales limitent habituellement le courant à environ 1mA par micron de largeur de ligne.

Afin de trouver la structure optimale, deux topologies extrêmes peuvent être considérées, une seule et unique plaque ou un serpentín fin. La figure 2.7 donne un exemple de ces deux façons de faire.

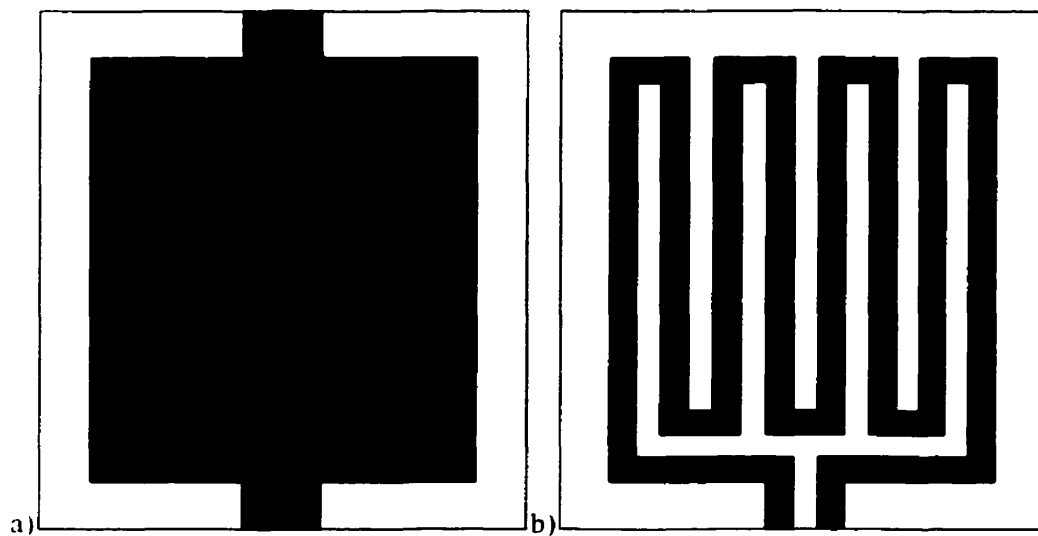


Figure 2.7 Topologies de la résistance de chauffage a) une seule plaque chauffée b) Un serpentín fin

La puissance de chauffage est le produit de la résistance électrique par le carré du courant qu'on y fait passer : $P=RI^2$. Dans le cadre de cette analyse, nous pousserons la technologie à sa limite

en prenant le courant maximal possible, soit $I = K w$, où K est la limite de courant par unité de largeur de ligne pour éviter l'électromigration et w est la largeur de la ligne.

Dans le cas de la plaque, si on néglige les effets de bord, la résistance est de :

$$R_{PLAQUE} = R_C \frac{L}{W} \quad (2.36)$$

Le courant maximal dans une ligne de largeur W est :

$$I_{MAX.PLAQUE} = KW \quad (2.37)$$

La puissance de chauffage maximale est donc :

$$P_{MAX.PLAQUE} = K^2 R_C L W = K^2 R_C A \quad (2.38)$$

Dans cette équation, A est la surface chauffée LW . On voit donc que la puissance thermique transmise est fonction de la surface et de deux paramètres du matériau conducteur.

Dans le cas du serpent, on suppose la même surface chauffée de L sur W . Les lignes du serpent sont parallèles à la longueur L . Le nombre de lignes conductrices parallèles peut être estimé par le rapport de la largeur sur la distance centre à centre de deux lignes conductrices. Si chacune des lignes a une largeur w et si on a un espacement y entre deux lignes, le nombre de lignes et le nombre de carrés par lignes sont de :

$$NbLignes_{SERPENTIN} = \frac{W}{w + y} \quad (2.39)$$

$$NbCarrésparLigne_{SERPENTIN} = \frac{L}{w} \quad (2.40)$$

La résistance dans le serpentín est donc de (souvent w et y sont égaux ou semblables) :

$$R_{SERPENTIN} = R_c \frac{LW}{w(w+y)} = R_c \frac{A}{w(w+y)} \approx R_c \frac{A}{2w^2} \quad (2.41)$$

La puissance thermique dégagée est (le courant maximal dans les lignes de largeur w est $K w$) :

$$P_{MAX,SERPENTIN} = \frac{w}{w+y} K^2 R_c A \approx \frac{1}{2} K^2 R_c A \quad (2.42)$$

La plaque dégage donc une puissance thermique supérieure deux fois plus grande que le serpentín. En fait, comme les calculs le montrent, peu importe la géométrie, lorsque le courant maximal suggéré est respecté, la puissance thermique transmise est directement proportionnelle à la surface couverte par le conducteur métallique. Ce résultat est exprimé ici pour la première fois, à la connaissance de l'auteur.

En ce qui concerne la résistance thermique, on a vu plus haut que la conduction dans les bras métalliques dominait souvent. Pour simplifier l'analyse quelques instants, nous allons considérer que le transport de chaleur est essentiellement dû à la conduction thermique dans ces bras métalliques. Il y a deux conducteurs électriques (aller-retour du courant sur la surface chauffée) et la largeur de chacun des deux est déterminée par le courant qui y passe : pour la plaque, le courant est $K W$ et la largeur doit être de W ; pour le serpentín, le courant est $K w$ et la largeur est de w . Les conductances thermiques sous vide sont :

$$G_{THERM.PLAQUE} = 2k_{METAL} \frac{We}{L_{BRAS}} \quad (2.43)$$

$$G_{THERM.SERPENTIN} = 2k_{METAL} \frac{we}{L_{BRAS}} \quad (2.44)$$

La conductance thermique est donc W/w fois supérieure dans la plaque que dans le serpent. Au bout du compte, c'est la température maximale atteinte qui nous intéresse. Celle-ci est le rapport de la puissance transmise et de la conductance thermique. On obtient alors :

$$T_{PLAQUE} = \frac{P_{MAX.PLAQUE}}{G_{THERM.PLAQUE}} = \frac{K^2 R_C}{2k_{METAL}} \frac{L_{BRAS}}{We} A \quad (2.45)$$

$$T_{SERPENTIN} = \frac{P_{MAX.SERPENTIN}}{G_{THERM.SERPENTIN}} = \frac{K^2 R_C}{2k_{METAL}} \frac{L_{BRAS}}{(w+y)e} A \approx \frac{K^2 R_C}{2k_{METAL}} \frac{L_{BRAS}}{2we} A \quad (2.46)$$

On remarque donc que le serpent est porté à une température $W/(w+y)$ (environ $W/2w$) plus élevée. Dans un cas typique pour lequel W vaut $100\mu\text{m}$ et w vaut $2\mu\text{m}$, la température atteinte est 25 fois plus grande. Un autre avantage est que le courant est 50 fois plus petit. Le fait que la résistance soit 625 fois plus grande dans le serpent est souvent considéré comme un avantage, car cette résistance est plus facilement mesurable. Ces considérations font du serpent le plus dense la topologie optimale pour une structure chauffante sous vide.

Sous air, la plaque peut être une solution avantageuse d'un point de vue thermique, si la conduction dans l'air entre la membrane et le substrat est semblable à la conduction dans le bras sous vide. Toutefois, avec une plaque, la conduction dans le bras sous vide est telle que les

dimensions de la membrane deviennent peu pratiques : elles sont de l'ordre du millimètre. Par contre, même avec une telle membrane, le gain en puissance de chauffage d'un facteur 2 seulement se fait aux dépens d'une résistance de chauffage beaucoup plus petite et d'un courant beaucoup plus élevé qu'il faudra acheminer vers le capteur.

L'équation 2.46, qui relie simplement la température de la surface du serpentín sur la membrane chauffée aux propriétés physiques et géométriques de la membrane est présentée ici pour la première fois.

2.7 Analyse électrostatique (électro-mécanique)

Entre une membrane en cours d'opération et le substrat, on peut trouver une différence de potentiel allant habituellement jusqu'à 5V. Cette structure est en fait un condensateur et la force électrostatique tend à rapprocher les deux surfaces.

La force électrostatique en question est :

$$F_{ELECTROSTATIQUE} = qE = \frac{CV^2}{d} \quad (2.47)$$

La force électrostatique est donc d'autant plus importante que la tension V est grande et que la distance d entre les surfaces est petite, pour une même capacité C . La capacité C est calculée en prenant compte de toutes les couches entre les surfaces conductrices de la membrane et du substrat :

$$C = A\epsilon_0 \left[\sum_{i, \text{MATERIAUX}} \frac{d_i}{\epsilon_i} \right]^{-1} \quad (2.48)$$

Dans cette équation, A est la surface de la structure. ϵ_0 est la permittivité du vide ($8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m), les ϵ_i sont les permittivités relatives des différentes couches et d_i est l'épaisseur de chacune de ses couches.

Supposons, comme lors de l'étude des considérations mécaniques, un pont et des conditions aux frontières telles que l'angle de déformation est nul aux extrémités du pont : la déflexion h sera alors de :

$$h = \frac{F}{L} \frac{L^4}{1664} \frac{1}{EI} \quad (2.49)$$

Dans cette expression, F est la force qui pousse le pont vers le bas, uniformément distribuée sur la longueur L . E est le module d'Young et I est le moment d'inertie (le moment d'inertie d'un pont est $I = we^3/12$: w est la largeur et e est l'épaisseur).

La force F est fonction de la distance entre les plaques et varie donc sur la longueur de la structure. L'équation suivante simplifie le problème en supposant que la variation est faible et donc que la force est constante. En conclusion, la déflexion atteinte est de :

$$h = \frac{12}{1664} \frac{V^2 L^3}{E w d^2 e^3} \frac{A \epsilon_0}{\sum_i \left(\frac{d_i}{d} \right) \frac{1}{\epsilon_i}} \quad (2.50)$$

Si le design est traditionnel, une couche d'oxyde recouvre le substrat et se trouve sous la région conductrice. En supposant une épaisseur des oxydes et du métal de $1\mu\text{m}$ chacun, une distance entre les surfaces de $1\mu\text{m}$, une tension de 1V , un module d'Young de la structure de 100 GPa et une longueur de membrane de $100\mu\text{m}$, la déflexion atteint quelques picomètres, soit quelques ppm de la distance entre les surfaces. Toutefois, si la différence de potentiel monte à 5V et que la membrane est longue de $300\mu\text{m}$, la variation atteint les nanomètres, soit environ une fraction d'un pour cent de la distance. Dans les deux cas, c'est faible, surtout en comparaison avec les variations mécaniques discutées auparavant. Enfin, il suffit de prendre des couches deux fois moins épaisses et une distance entre les deux surfaces deux fois moins grande pour que la variation atteigne la centaine de nanomètres, soit plus de 10% de la distance de 500nm qui sépare les surfaces. On voit donc que la force électrostatique, sans être une considération majeure, ne doit pas être négligée si le pont ou la membrane est placée très près du substrat ($1\mu\text{m}$ ou moins).

2.8 *Simplicité et robustesse de la fabrication*

La simplicité et la robustesse de la fabrication sont aussi des critères à considérer lors de l'analyse d'un design. En effet, un faible rendement de fabrication ou un coût de fabrication exorbitant sont des obstacles majeurs à la commercialisation éventuelle d'un produit.

Cependant, ces critères sont qualitatifs et ne se prêtent pas à l'analyse aussi bien que les considérations précédentes. De plus, ils sont fonction de l'appareillage et des techniques disponibles. Nous limiterons donc notre commentaire à bien définir la simplicité et la robustesse dans le cadre de ce mémoire.

La simplicité de fabrication implique l'usage d'un procédé de fabrication CMOS standard auquel on ajoute des étapes ultérieures de dépôt et de mises en forme de couches minces simples. Dans la mesure du possible, la photolithographie avec alignement est évitée, et surtout la photolithographie sur la face arrière, plus difficile et qui risque d'endommager les structures mécaniques sur la face avant [55].

La robustesse du design et du procédé de fabrication signifie que des variations inévitables du procédé d'un dispositif à un autre ou d'un lot à un autre ont un impact mineur sur le fonctionnement du dispositif ou son rendement de fabrication.

2.9 Sommaire des relations importantes

Ce sommaire dresse pour la première fois une liste de relations qui permettent d'étudier le comportement ou les limites physiques d'un dispositif thermique MEMS en couche mince. Les calculs ayant mené aux équations ainsi que l'explication des symboles ont été donnés précédemment.

a) Analyse thermique

Conduction thermique de la membrane et dans les bras, sous vide ou sous air

$$G_{MEMBRANE,VIDE} = 0$$

$$G_{MEMBRANE,AIR} = \sum_i k_{air} \frac{A_{membrane}}{d_{gap}}$$

$$G_{TH.TOTAL} = \sum_i k_i \frac{w_i e_i}{l_i} \quad (2.9)$$

$$G_{BRAS.AIR} = G_{BRAS.VIDE} \alpha \cdot \coth(\alpha) \quad (2.25)$$

$$\text{où } \alpha = Kl = \sqrt{\frac{l^2}{ek_{BRAS}} \left(\epsilon \sigma T_{SLB}^3 + \frac{k_{AIR}}{d_{GAP}} \right)} = \sqrt{\frac{(\epsilon \sigma T_{SLB}^3 + \frac{k_{AIR}}{d_{GAP}}) A}{G_{BRAS.VIDE}}} \quad (2.26)$$

b) Analyse mécanique

Élévation en fonction de la contrainte résiduelle compressive (après fabrication)

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (\text{loi de Hooke})$$

$$h \approx \sqrt{\epsilon} \cdot l \quad (2.30)$$

c) Analyse thermomécanique

Rayon de courbure et élévation en fonction d'un échauffement dans un bilame

$$r = l \frac{5 + (E_1 / E_2) + (E_2 / E_1)}{3 \Delta \alpha \Delta T} \quad (2.33)$$

$$h = \frac{L^2}{8r} \quad (2.34)$$

d) Analyse thermorésistive

Température maximale atteinte par chauffage d'un serpentin par un courant maximal pour éviter l'électromigration

$$T_{SERPENTIN} = \frac{P_{MAX.SERPENTIN}}{G_{THERM.SERPENTIN}} = \frac{K^2 R_C}{2k_{METAL}} \frac{L_{BRAS}}{(w+y)e} A \approx \frac{K^2 R_C}{2k_{METAL}} \frac{L_{BRAS}}{2we} A \quad (2.46)$$

e) Analyse électrostatique

Élévation due à une différence de potentiel entre la membrane et le substrat.

$$h = \frac{12 V^2 L^3}{1664 E w d^2 e^3 A \epsilon_0 \sum_i \left(\frac{d_i}{d} \right) \frac{1}{\epsilon_i}} \quad (2.50)$$

Chapitre III

État de l'art

Au chapitre 2, quelques capteurs thermiques et leurs besoins ont été décrits. Le tableau 3.1 résume les besoins de chacun des capteurs.

Ce chapitre présente et critique les structures et procédés de fabrication traditionnellement utilisés pour satisfaire les besoins des différentes applications. Ceci permettra de mieux mettre en relief l'origine, les avantages, désavantages et contraintes de la nouvelle structure proposée dans ce mémoire.

Dans un premier temps, les techniques de microfabrication commerciale de la microélectronique sont montrées brièvement. Par la suite, les techniques de microfabrication propres aux systèmes micro électromécaniques, les techniques de micro-usinage, sont présentées par leur application dans les designs traditionnels de capteurs thermiques en couches minces.

Tableau 3.1 Besoins thermiques des différents capteurs. Un X exprime que l'application a un tel besoin.

Type de capteur	Isolation thermique par les bras	Isolation thermique entre la membrane et le substrat dans l'air	Contrôle de la distance membrane substrat (dans l'air)	Chauffage de la membrane en cours d'opération	Mise en forme de couches après libération de la membrane
Gaz	X	X		X	X
Infrarouge	X	X			X
Pression	X	Au contraire	X		
Tension rms	X	X			

3.1 Les procédés de microfabrication de circuits intégrés

Les capteurs thermiques en couches minces qui font l'objet de ce mémoire sont des capteurs qu'il est possible d'intégrer dans un procédé de microfabrication de circuits intégrés CMOS. Cette section se penchera plus particulièrement sur le procédé du silicium, parce qu'il est le procédé le plus répandu, le plus populaire, le moins coûteux à l'heure actuelle et surtout parce que c'est le procédé utilisé dans le cadre des travaux de ce mémoire.

Les procédés de microfabrication sont complexes, mais leurs étapes se résument essentiellement à cinq techniques : choix d'un substrat, dépôt ou croissance thermique de couches minces, gravure de couches minces, implantation et diffusion de dopants, mise en forme par lithographie.

Le choix du substrat est l'étape la plus simple, tout en n'étant pas triviale. Une gaufre de silicium de 2, 4, 6, 8 ou 12 pouces de diamètre avec une épaisseur, une résistivité et un type déterminés est choisie.

Dans les techniques de fabrication commerciale, la croissance thermique de couches minces se limite à la croissance dans un four à haute température d'une couche mince d'oxyde de silicium sur une surface de silicium. Le dépôt de couches minces consiste en l'évaporation, la pulvérisation, le dépôt par vapeurs chimiques (PECVD ou LPCVD), etc., de couches métalliques ou isolantes, comme l'aluminium, le polysilicium, l'oxyde de silicium et le nitrure de silicium.

Pour ajouter localement des dopants dans le silicium pour former les transistors ou d'autres structures, on utilise l'implantation ionique et la diffusion.

La gravure utilise des produits chimiques en phase gazeuse, plasma ou liquide pour graver les couches déposées ou crues si elles sont exposées à la gravure après l'étape de photolithographie. La combinaison de la lithographie et de la gravure assure la mise en forme des couches minces.

Ces cinq étapes sont les principales. Cependant, les procédés commerciaux de microfabrication comptent de nombreuses autres étapes, comme le nettoyage du substrat, la planarisation, les recuits thermiques, etc., qui influencent grandement la qualité des transistors, mais elles ajoutent habituellement peu au nombre des couches et à leur géométrie.

Un procédé typique de microfabrication donne l'empilement de couches suivant, du bas vers le haut :

- Substrat de silicium de 500-700 μm d'épais ;

Procédés à haute température

- Implantation ionique et diffusion des puits ;
- Croissance d'un oxyde de champ de 1 μm d'épais ;
- Croissance d'oxyde de grille de quelques dizaines de nanomètres ;
- Dépôt d'une couche de polysilicium qui fait environ un tiers de micron d'épais ;
- Croissance d'un oxyde inter-polysilicium de quelques nanomètres d'épais ;
- Implantation ionique et diffusion des transistors ;
- Dépôt d'une couche de polysilicium qui fait environ un tiers de micron d'épais ;

Procédés à basse température

- Dépôt d'une couche d'oxyde de silicium d'un micron d'épais pour isoler le silicium ou le polysilicium de la couche métallique ;
- Dépôt d'une couche métallique d'un micron d'épais ;

- Dépôt de couches d'oxyde de silicium pour agir comme isolant entre les couches métalliques et de couches métalliques de façon à obtenir le nombre de couches conductrices désirées ;
- Dépôt d'une couche d'oxyde et de nitrure de silicium pour agir comme couche de passivation.

Il est bien entendu que toutes ces couches peuvent être mises en forme. Cependant, des règles de mise en forme doivent être suivies, ce sont les règles de conception, propres à chacun des procédés.

Pour un fabricant de capteurs, l'utilisation d'un procédé de fabrication commercial présente de nombreux avantages : il n'est pas nécessaire d'acheter des appareils coûteux et de développer des procédés complexes ; les coûts de fabrication sont relativement modestes ; les performances électriques sont connues et garanties par le fabricant ; les ressources sont présentes pour assurer une production à grand volume.

Pour un concepteur de capteurs, toujours, un avantage supplémentaire consiste en la possibilité d'intégrer son capteur à un circuit électronique d'excitation, de lecture du signal et de traitement du signal sur le même dé de silicium. Par contre, le concepteur fait face à de nombreuses contraintes : il ne peut choisir les couches et leur ordre d'empilement ; il ne peut choisir les épaisseurs et les propriétés mécaniques des couches déposées ; le fabricant ne lui garantit pas les épaisseurs et les propriétés mécaniques ; les épaisseurs et propriétés mécaniques ne sont pas connues du concepteur et si celui-ci les connaît à un certain moment, il est toujours possible que le fabricant change les propriétés des couches afin d'améliorer le comportement électronique de son procédé.

Malgré tous les désavantages techniques, les avantages économiques font en sorte que les systèmes micro électromécaniques fabriqués à base de procédés commerciaux CMOS demeurent des dispositifs prometteurs, techniquement et commercialement. C'est ainsi que le concepteur de capteurs qui utilise le procédé CMOS s'efforcera de rendre son design le plus robuste possible face aux variations éventuelles du procédé.

3.2 Les designs traditionnels et leurs procédés de fabrication : les trois méthodes principales

Après la microfabrication commerciale, le manufacturier de capteurs peut procéder aux étapes dites de post-procédé. Ces étapes peuvent consister en des étapes traditionnelles supplémentaires : dépôt, gravure et mise en forme de couches minces supplémentaires. D'autres méthodes ont été développées pour les systèmes micro électromécaniques, ce sont les techniques de micro-usinage.

Dans les cas des capteurs thermiques, il existe trois techniques de micro-usinage traditionnelles, ce sont la gravure anisotrope par la face arrière du dé, la gravure anisotrope par la face avant du dé et la gravure sacrificielle d'une couche en surface. Ces trois techniques ont pour but de libérer une structure suspendue, une membrane, un pont ou une structure en porte-à-faux, à la surface du substrat de silicium. Les deux premières techniques y arrivent en gravant le substrat de silicium. La troisième technique grave une couche de l'empilement afin de dégager les couches qui sont au-dessus de celle-ci. La figure 3.1 illustre ces trois méthodes.

D'autres techniques existent pour arriver à une structure suspendue ou d'autres fins mécaniques, mais sont moins répandues pour les dispositifs thermiques conçus pour la fabrication en grand volume. La soudure de gaufres de silicium ou d'une gaufre de silicium à un substrat de verre est une de ces techniques. La mise en forme par laser est une autre technique. Enfin, le dynamisme du domaine des systèmes micro électromécaniques fait en sorte que l'on pourrait continuer encore longtemps la liste des techniques de micro-usinage développées au cours des années 1990.

Les sections suivantes décrivent les techniques de micro-usinage et leurs avantages comparatifs pour les capteurs thermiques.

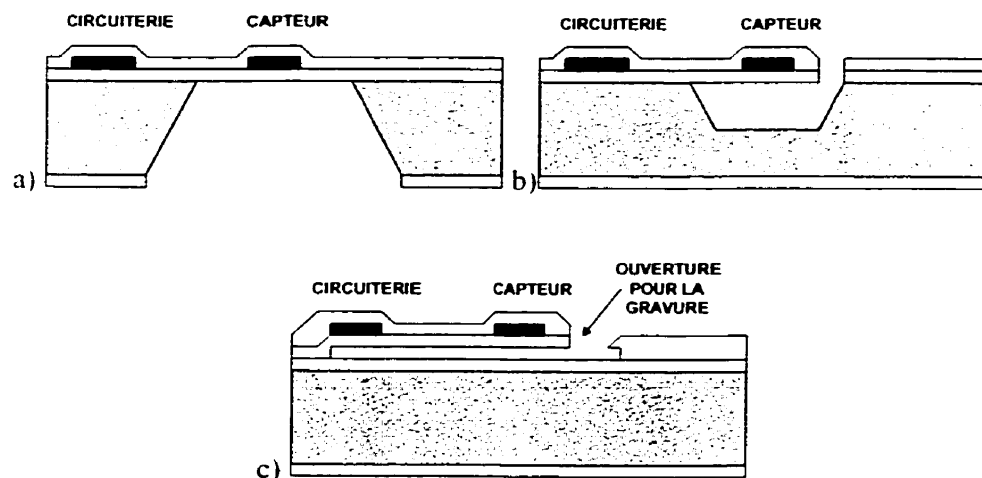


Figure 3.1 Les trois designs traditionnels et leurs procédés de fabrication : a) gravure anisotrope de volume par la face arrière du dé ; b) gravure anisotrope de volume par la face avant du dé ; c) gravure sacrificielle d'une couche d'un empilement en surface. Légende : Blanc : oxyde, Noir : aluminium, Gris : Silicium.

3.3 *La gravure anisotrope de volume par la face arrière du dé*

La figure 3.2 illustre un procédé de fabrication typique utilisant la gravure anisotrope de volume par la face arrière du dé. La figure 3.3 montre le résultat typique de ce procédé selon différentes vues.

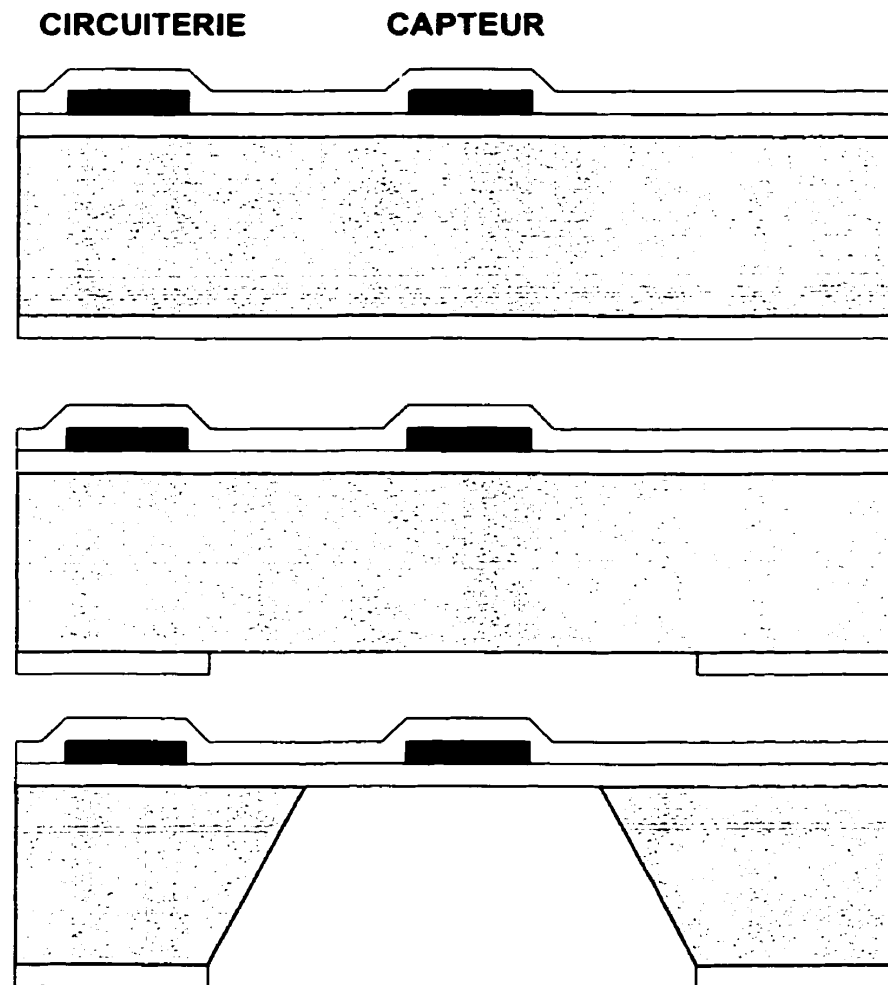


Figure 3.2 Procédé de fabrication typique pour la gravure anisotrope par la face arrière du dé.

1) Gaufre avec fabrication CMOS ; 2) alignement au dos, photolithographie et mise en forme d'un rectangle sur la face arrière ; 3) plongeon dans un graveur anisotrope et gravure par le dos. L'angle de la gravure est de 54° . La gravure est arrêtée par l'atteinte d'une couche isolante, d'une couche d'arrêt de gravure ou par retrait de la solution. Légende : Blanc : oxyde, Noir : aluminium, Gris : Silicium.

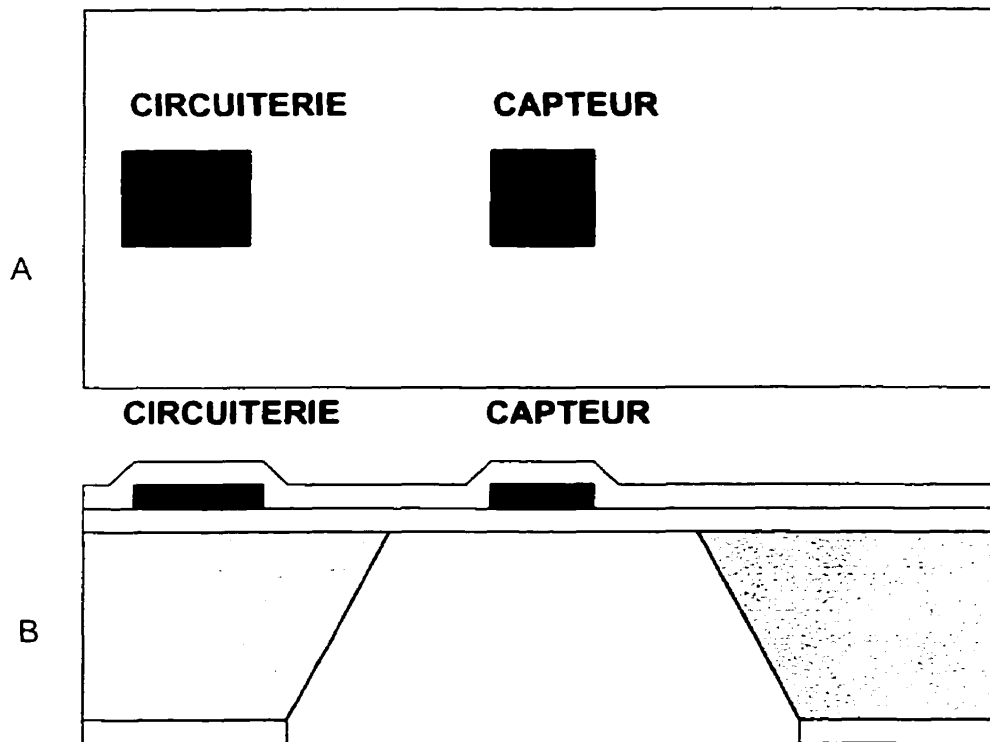


Figure 3.3 A) et B). Différentes vues d'un design fabriqué par gravure anisotrope par la face arrière du dé. La gravure est faite par le dos, il y a un grand trou sur la face arrière, mais rien n'est visible sur la face avant. A) Vue de haut. B) Vue de côté.

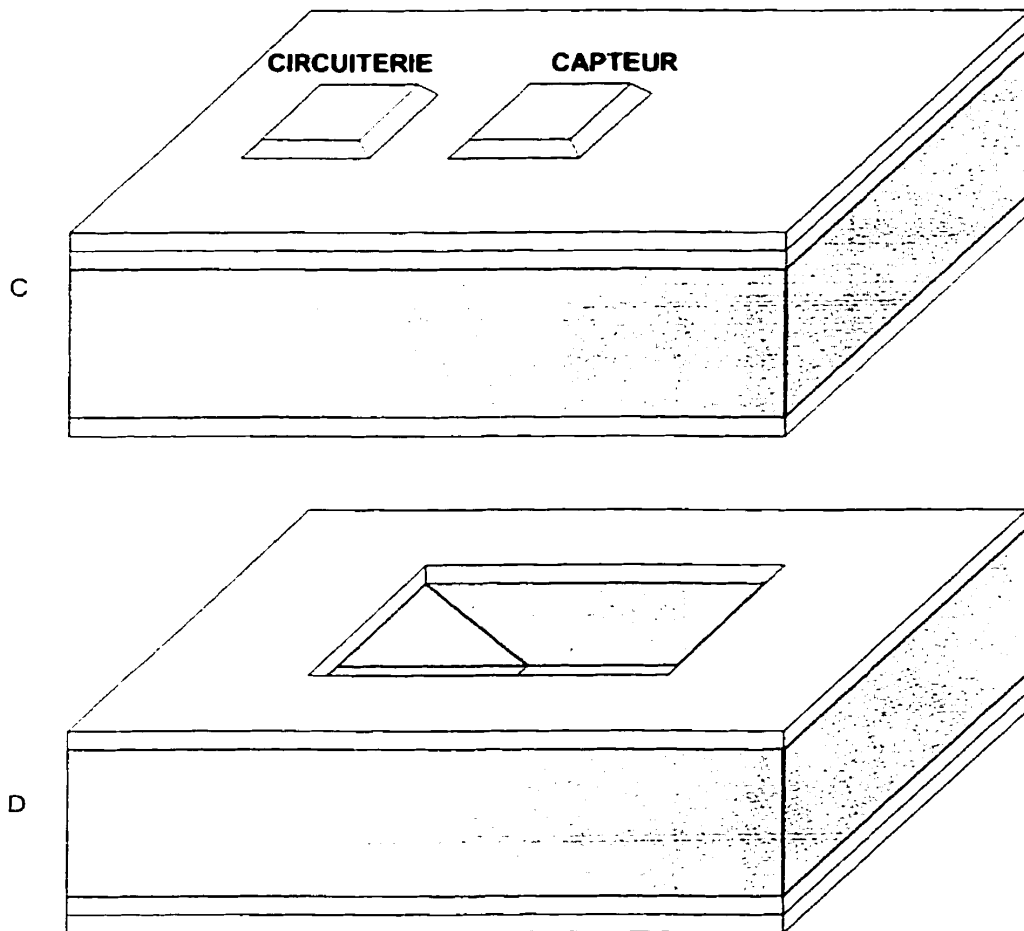


Figure 3.3 C) et D). C) Vue de face et de côté. D) Vue de derrière et de côté.

Le procédé de fabrication utilisant la gravure anisotrope par la face arrière du dé se déroule de la façon suivante. D'abord, la gaufre de silicium subit la fabrication CMOS commerciale décrite précédemment. La post fabrication commence alors (fig. 3.2, haut). S'il n'y a pas de couche d'oxyde (ou de nitrure) de silicium au dos de la gaufre, on commence par en déposer une. À l'aide d'une aligneuse de masque double face, on effectue la mise en forme de l'oxyde de silicium (photolithographie et gravure) du dos du substrat pour définir les ouvertures à la gravure

anisotrope (fig. 3.2. centre). On place alors la gaufre dans une solution de gravure anisotrope à température et environnement contrôlés, puis on laisse la gravure se faire. La gravure s'arrête lorsque la gaufre est retirée de la solution et rincée ou lorsque la gravure atteint une région qui se grave lentement (fig. 3.2. bas).

Les graveurs anisotropes traditionnels sont l'EDP, le KOH et le TMAH. On les nomme graveurs anisotropes parce que la vitesse de gravure n'est pas uniforme dans toutes les directions. En effet, la vitesse est différente selon les plans cristallins. Si les rapports entre les vitesses sont suffisamment grands, on remarque que la gravure affiche des facettes déterminées : ce sont les plans qui se gravent lentement. Les rapports de vitesse varient selon les graveurs, la température et les conditions ambiantes mais en général, le plan cristallin le plus lent est le plan $\{111\}$. La première conséquence de cette gravure anisotrope est que la sous-gravure, c'est-à-dire la gravure sous le masque, peut être contrôlée. En effet, sur une gaufre $\{100\}$ traditionnelle, l'ouverture en surface résultera en un rectangle fait de directions (100) le plus grand possible [56], c'est-à-dire dont les côtés sont parallèles et perpendiculaires au méplat primaire de la gaufre. On peut voir un exemple de cette propriété des graveurs anisotropes à la figure 3.4.

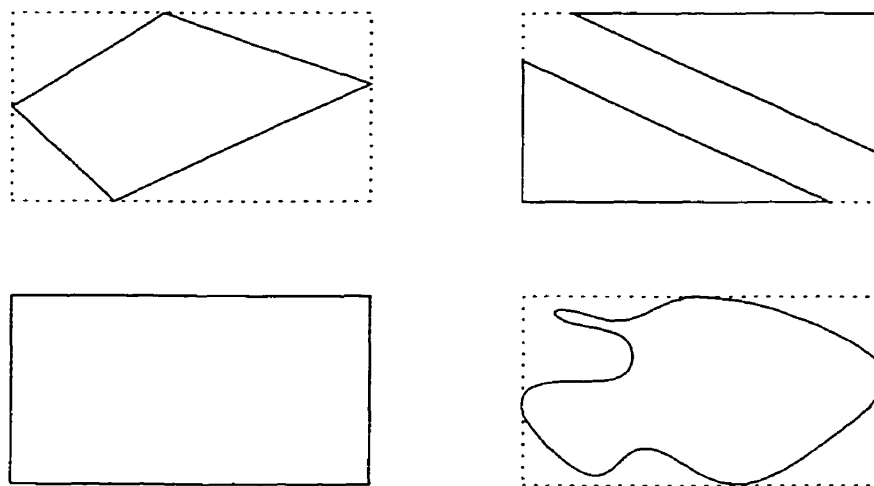


Figure 3.4 Propriété des graveurs anistropes : plus grand rectangle. Ils forment le plus grand rectangle formé de directions (100) possible (pointillé) selon les limites du masque (continu) [56].

La seconde conséquence est que le trou sous cette surface aura la forme d'une pyramide (tronquée ou non, selon que la pointe de la gravure peut être atteinte dans le temps de gravure imparti ou avec l'épaisseur de la gaufre donnée). Les plans de cette pyramide ont un angle de 54° avec la base. Aussi, si on désire une membrane de côté c sur la face avant, l'ouverture à la gravure sur la face arrière doit avoir une taille de $c + t\sqrt{2}$. C'est-à-dire que la moindre petite ouverture en surface (c petit) nécessite une ouverture de $700\mu\text{m}$, si la gaufre fait $500\mu\text{m}$ d'épais.

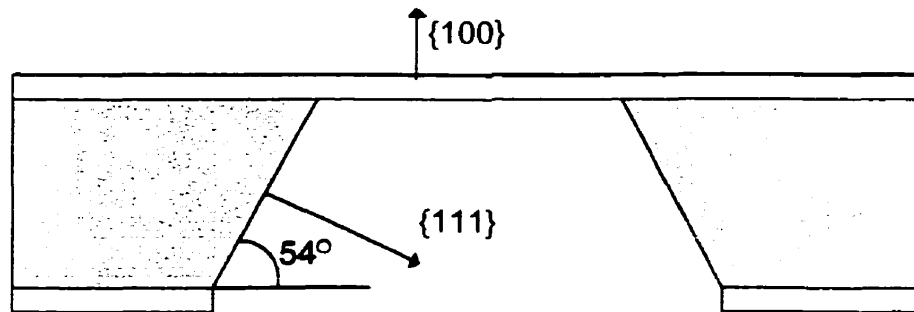


Figure 3.5 Propriété des graveurs anistropes : gravure à angle. La gravure est stoppée par le plan cristallin $\{111\}$, ce qui fait en sorte que la gravure affiche des côtés selon une pyramide tronquée avec un angle de 54° .

Les considérations pratiques sont les suivantes. Tout d'abord, bien que les couches isolantes qui servent de masque à la gravure soient gravées lentement, leur taux de gravure n'est pas nul : il faut s'assurer que la couche de masque sur la face arrière est suffisamment épaisse. De la même façon, il faut protéger la face avant contre la gravure anisotrope. Trois méthodes principales sont utilisées : le dépôt d'une couche isolante protectrice ; la modification ou le choix d'une solution de gravure de façon à s'assurer que les couches métalliques ne sont pas attaquées ; l'utilisation d'un support mécanique qui protège efficacement la face avant.

Aussi, comme on l'a vu, la gravure anisotrope consomme une grande partie du substrat de silicium. Ceci a pour effet de rendre plus fragile la gaufre de silicium, si la densité de trous est grande. Enfin, la photolithographie sur la face arrière suppose que la gaufre est couchée sur sa face avant. Il est alors possible d'égratigner la face avant : les précautions sont de mise. Ces deux considérations expliquent néanmoins les réticences des fonderies commerciales à fabriquer la circuiterie électronique après la gravure anisotrope. Pour plus de détails sur la gravure

anisotrope, les mémoires de Robert Antaki au laboratoire LISA [3] et de Sasan Naseh, de l'Université Concordia [57] abordent le sujet en détail.

Si une couche sensible doit être déposée, elle peut maintenant l'être. Il est à noter que la surface sur laquelle on dépose la couche n'est nullement trouée. Seule une déformation des membranes dues aux contraintes qui se libèrent peut faire en sorte que, vu de la face avant, la gaufre gravée paraisse différente de la gaufre non-gravée. Ceci permet une mise en forme simple de la couche sensible, si ce n'est la fragilité de la gaufre.

En ce qui concerne l'isolation thermique, celle-ci est habituellement grande si on prend la précaution de graver tout le silicium sous la membrane, car le silicium cristallin conduit très bien la chaleur, presque aussi bien que certains métaux. La conduction dans les solides est alors limitée à une membrane faite d'isolant et de conducteurs qui permettent de lire la température ou de chauffer la membrane. Toutefois, puisque aucune ouverture n'est pratiquée dans la membrane, la conduction se fait dans toutes les directions et est donc plus grande que si la membrane était trouée. La conduction dans l'air est par contre minimale, parce que la distance entre la membrane et le substrat est grande (plusieurs dizaines de microns).

Les contraintes dans les différentes couches peuvent mener à une déformation de la membrane. On peut limiter cette déformation en déposant une couche légèrement en tension avant la gravure [46]. En ce qui concerne le chauffage de la membrane, le polysilicium peut être utilisé, car il se trouve parmi les couches minces de la membrane. Ce matériau a les avantages d'être très résistif (trois ordres de grandeur de plus que l'aluminium), de présenter un coefficient d'expansion thermique assez faible (6 fois moins que l'aluminium) et de ne pas être limité par

l'électromigration ou par une température de fusion relativement faible, comme c'est le cas de l'aluminium.

Les avantages pour le chauffage et la simplicité du dépôt sur la face avant font de cette méthode une technique fortement prisée pour les capteurs de gaz opérés à haute température, surtout en recherche [5, 11] et plus récemment pour les applications commerciales (la compagnie Motorola, par exemple). On peut aussi les retrouver sur les capteurs infrarouges et capteurs de tension rms. Par contre, cette technique n'est pas utilisée pour les capteurs thermiques de pression : il n'y a tout simplement pas de substrat bien défini sous la membrane.

Le tableau 3.2 résume les avantages et limites de la gravure anisotrope de volume par la face arrière du dé. Le tableau 3.3 dresse une liste de résultats obtenus à l'aide de cette technique.

Tableau 3.2 Avantages et désavantages des techniques traditionnelles : gravure anisotrope de volume par la face arrière du dé (dos)

Technique	Isolation thermique (vide)	Isolation thermique (air)	Distance substrat à membrane faible	Simplicité et robustesse du procédé	Simplicité du dépôt de couches supplémentaires
Dos	+	+	--	=	+

Légende : ++ : très bon ; + : bon ; = : moyen ; - : mauvais ; -- : très mauvais

Tableau 3.3 Résultats obtenus en utilisant la gravure anisotrope de volume par la face arrière du dé (dos)

Référence	Application	Isolation thermique (vide)	Isolation thermique (air)
[11]	Gaz	250 μ W/K	-
[58]	Gaz	130 μ W/K	-

3.4 La gravure anisotrope de volume par la face avant du dé

La figure 3.6 illustre un procédé de fabrication typique utilisant la gravure anisotrope de volume par la face avant du dé. La figure 3.7 montre le résultat typique de ce procédé selon différentes vues.

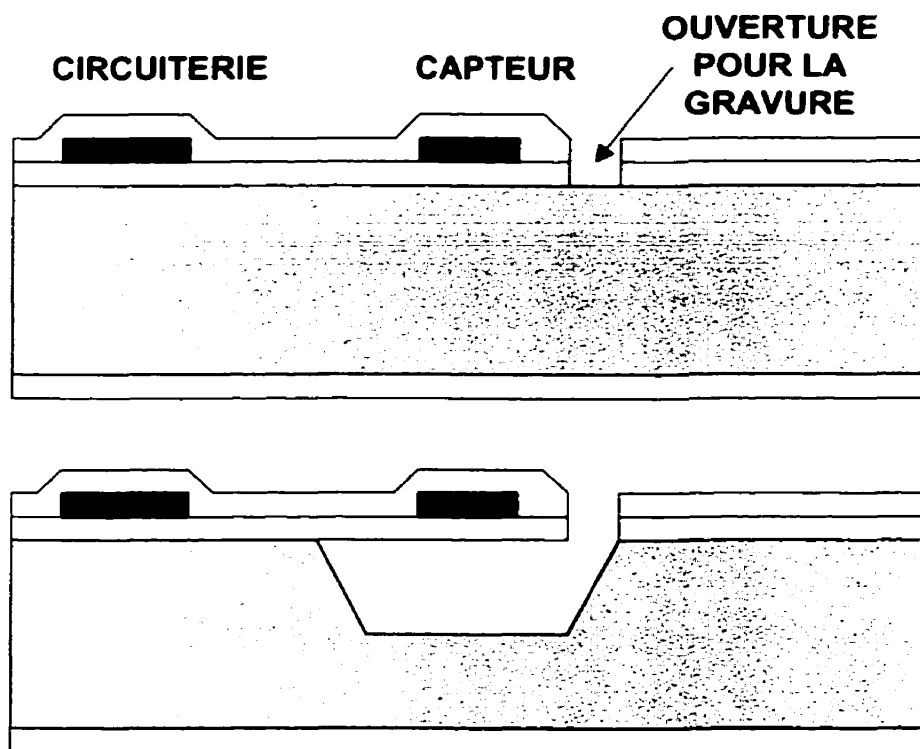


Figure 3.6 Procédé de fabrication typique pour la gravure anisotrope par la face avant du dé. 1) Gaufre avec fabrication CMOS : les ouvertures sont naturellement faites en laissant le silicium à graver nu ; 2) plongeon dans un graveur anisotrope et gravure par la face avant. L'angle de la gravure est de 54° . La gravure est arrêtée par l'atteinte du fond de la pyramide ou de la gaufre ou par retrait de la solution. Légende : Blanc : oxyde, Noir : aluminium, Gris : Silicium.

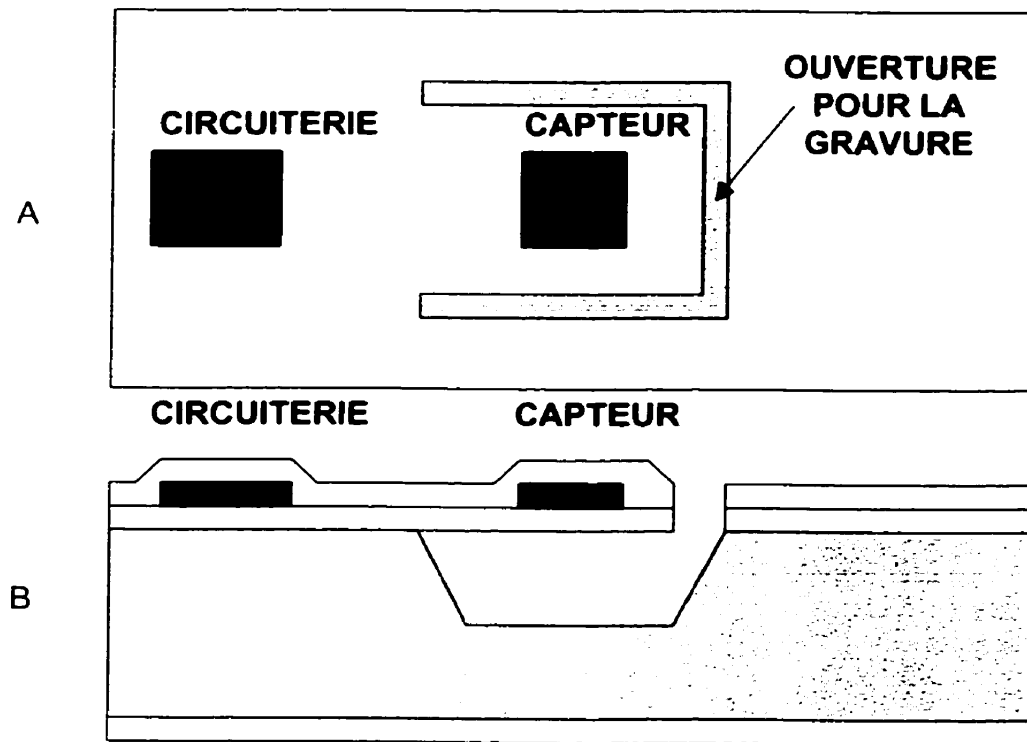


Figure 3.7 A) et B) Différentes vues d'un design fabriqué par gravure anisotrope par la face avant du dé. La gravure est faite par la face avant, le trou est donc limité au masque de la face avant et le trou est visible et profond sur la face avant. A) Vue de haut. B) Vue de côté.

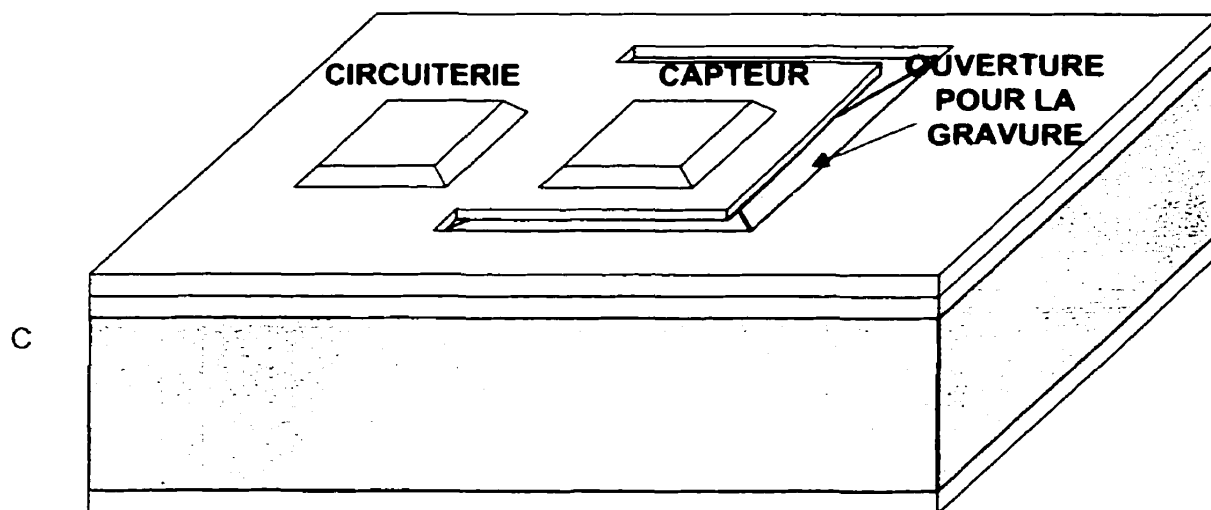


Figure 3.7 C) Vue de côté et de haut

Le procédé de fabrication utilisant la gravure anisotrope par la face avant du dé se déroule de façon analogue au procédé de fabrication utilisant la face arrière. La post fabrication commence avec la réception de la gaufre de la fonderie commerciale (fig. 3.6, haut). On a laissé les ouvertures à la gravure lors de cette fabrication, aucun alignement ou mise en forme n'est nécessaire. On place alors la gaufre dans la solution de gravure anisotrope à température et environnement contrôlés. La gravure s'arrête lorsque la gaufre est retirée de la solution et rincée ou lorsque la gravure atteint le fond de la pyramide ou de la gaufre (fig. 3.6, bas).

Les graveurs anisotropes et les considérations géométriques sont les mêmes pour la gravure par la face avant que par la face arrière. La durée de la gravure n'est toutefois plus seulement une question de profondeur de gravure mais aussi du temps nécessaire à faire la gravure sous la structure (le pont ou le cantilever). La figure 3.8 illustre ce phénomène en montrant le déroulement de la gravure tel que vu en surface.

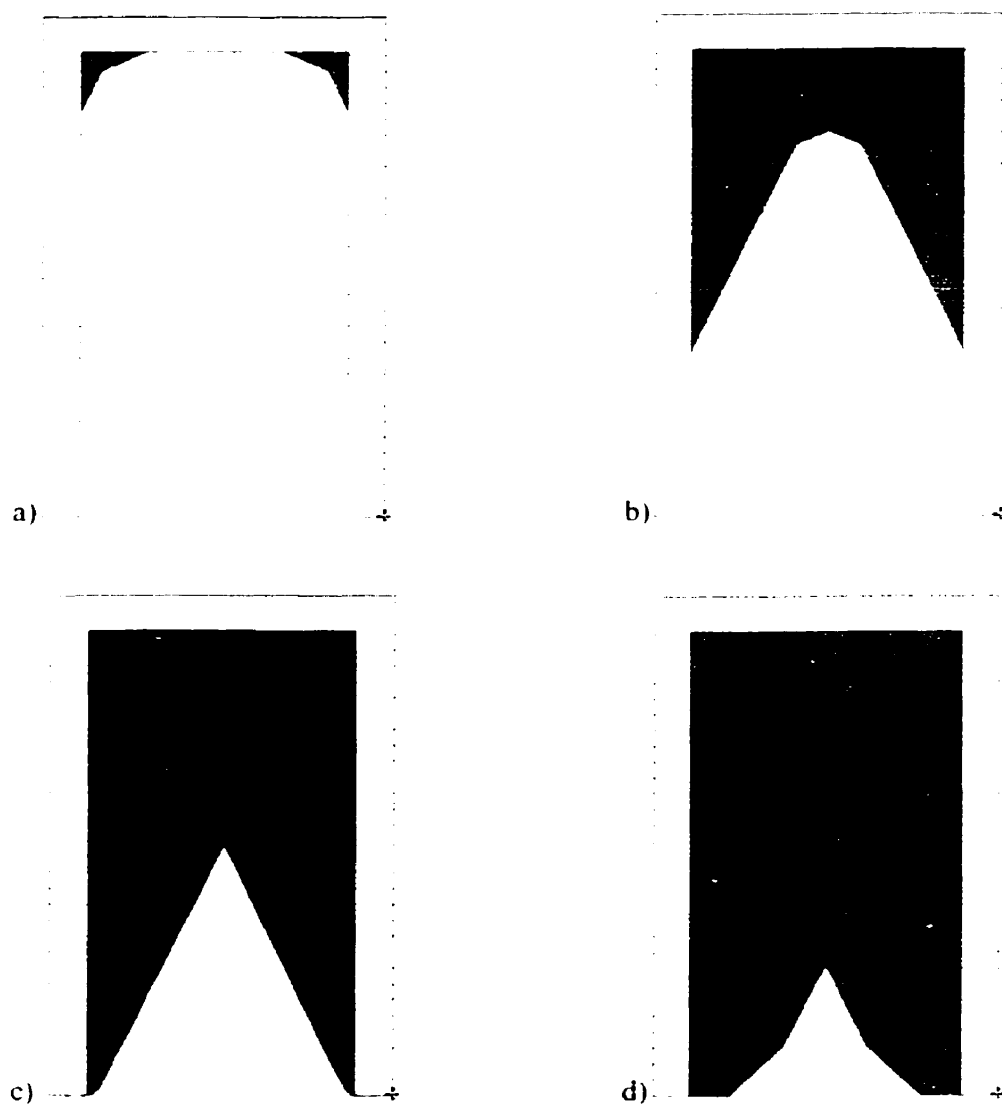


Figure 3.8 Vue en surface du déroulement d'une gravure anisotrope de la face avant. En a), la gravure commence autour du coin convexe (tel que vu par la plaque) selon deux plans distincts. En b) la gravure continue jusqu'à ce que les deux plans amorcés en a) se rejoignent. En c), le plus rapide des deux plans demeure. En d), lorsque le bord est atteint, un plan moins rapide prend aussi place.

La figure 3.8 montre que les plans cristallins se rencontrent sous les structures pour former des régions très pointues. Si la structure à libérer présente des contraintes résiduelles importantes, ces endroits pointus sont autant de zones de concentration de contraintes qui peuvent donner lieu à des bris.

On peut éviter les brisures en utilisant des méthodes appropriées, comme les techniques de compensation [59] ou l'emploi de «cathlers» [57]. La première technique consiste à choisir un angle pour la structure tel que la concentration de contrainte ne se fera pas. La seconde technique, développée à l'Université Concordia par le groupe du Prof. Landsberger [57], consiste à garder le cantilever horizontal tant que les risques de concentration de contrainte ne sont pas éliminés, en attachant le cantilever à une structure à son extrémité qui se grave plus lentement que le cantilever et pour qui les brisures n'affectent pas le comportement. Par contre, cette dernière technique entraîne l'emploi de cavités beaucoup plus grandes et l'ajout d'une masse à l'extrémité.

En conclusion, la profondeur de la gravure anisotrope par la face avant est déterminée par la géométrie de la structure à libérer. Si la structure n'est pas très grande et si elle a été bien conçue, la gravure peut être moyennement profonde, c'est-à-dire 100 à 300 microns typiquement.

Cette technique présente donc deux avantages en termes de simplicité de fabrication : la gaufre n'est pas rendue fragile par le procédé et la gravure ne nécessite pas de lithographie, elle peut se faire dès la fin de la microfabrication commerciale. Toutefois, les problèmes viennent lors du

dépôt d'une couche sensible, au besoin. Les trous profonds visibles de la surface nuisent au dépôt de la résine photosensible et à son développement, comme au dépôt de la couche sensible.

En ce qui concerne l'isolation thermique, cette technique est la meilleure des trois, parce qu'il est possible de mettre en forme les bras qui relient la membrane au substrat de façon à minimiser la conduction thermique. Si la cavité est suffisamment grande et profonde, la conduction dans l'air sera aussi petite. Les contraintes dans les couches peuvent poser un plus grand problème, car les structures sont plus libres de bouger, aussi doit-on en tenir compte dans le design et minimiser leur impact. On peut aussi déposer et mettre en forme une couche de compensation de contrainte afin de réduire une éventuelle déformation, mais la technique gagne alors en complexité. Enfin, ici aussi, le polysilicium peut être utilisé comme élément chauffant avec les avantages qui s'y rattachent.

C'est la technique par excellence pour les capteurs qui ne nécessitent qu'une grande isolation thermique sans couche supplémentaire déposée comme les capteurs de tension moyenne. Cette technique est employée parfois dans le cas des capteurs de pression [60] et des capteurs infrarouges [46]. La surface que l'on retrouve à habituellement plus de 100µm de profond peut servir à faire un capteur de pression de bonne qualité, avec une pression limite haute un peu basse, étant donné la grande distance entre les surfaces, mais une pression limite basse assez basse, vu la faible conduction dans les bras.

Le tableau 3.4 résume les avantages et limites de la gravure anisotrope de volume par la face arrière du dé. Le tableau 3.5 dresse une liste de résultats obtenus à l'aide de cette technique.

Tableau 3.4 Avantages et désavantages des techniques traditionnelles : gravure anisotrope de volume par la face avant du dé (face)

Technique	Isolation thermique (vide)	Isolation thermique (air)	Distance substrat à membrane faible	Simplicité et robustesse du procédé	Simplicité du dépôt de couches supplémentaires
Face	++	++	=	+	-

Légende : ++ : très bon ; + : bon ; = : moyen ; - : mauvais ; -- : très mauvais

Tableau 3.5 Résultats obtenus en utilisant la gravure anisotrope de volume par la face avant du dé (face)

Référence	Application	Isolation thermique (vide)	Isolation thermique (air)
[12]	Gaz	125 μ W/K	-
[15]	Pression	27 μ W/K	-
[50]	Bandgap	19 μ W/K	-
[30]	Pression	4 μ W/K	10 μ W/K

3.5 La gravure sacrificielle de couches minces en surface du dé

La figure 3.9 illustre un procédé de fabrication typique utilisant la gravure sacrificielle en surface. La figure 3.10 montre le résultat typique de ce procédé selon différentes vues.

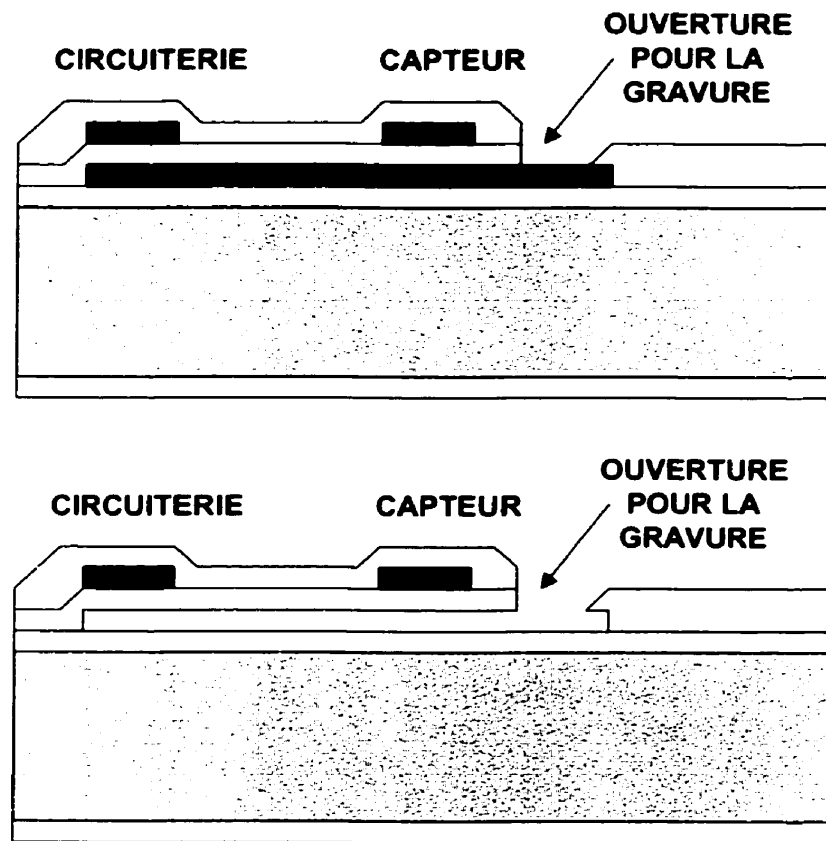


Figure 3.9 Procédé de fabrication typique pour la gravure sacrificielle en surface du dé. 1) Gaufre avec fabrication CMOS : les ouvertures sont naturellement faites en laissant la couche sacrificielle à graver nue ; 2) plongeon dans un graveur et gravure par la face avant. La gravure progresse horizontalement, entre les couches. La gravure est arrêtée par la gravure totale de la couche sacrificielle ou par le retrait de la solution.

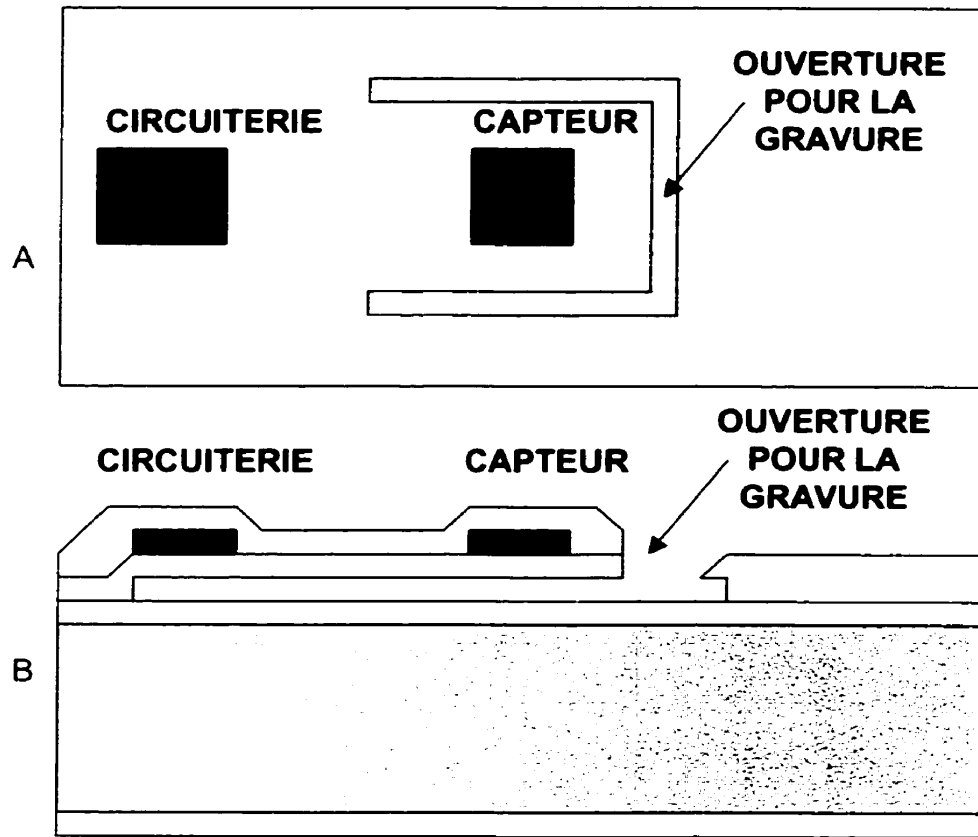


Figure 3.10 A) et B) Différentes vues d'un design fabriqué par gravure sacrificielle en surface du dé. La gravure est faite par la face avant. Le trou est visible et peu profond sur la face avant.
 A) Vue de haut. B) Vue de côté. Légende : Blanc : oxyde, Noir : aluminium, Gris : Silicium.

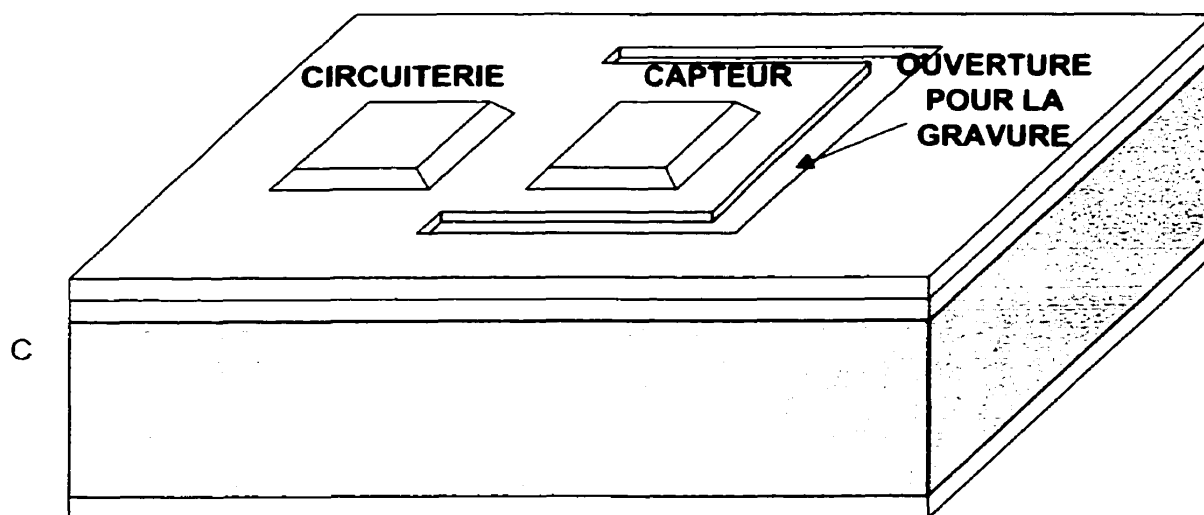


Figure 3.10 C) Vue de haut et de côté.

La gravure sacrificielle de couches minces en surface du dé consiste à graver une ou des couches particulières de l'empilement de couches minces. La gravure sacrificielle dont il est question dans ce mémoire est celle de l'aluminium. Il est à noter que d'autres procédés, dont il ne sera pas question ici parce qu'ils sont utilisés dans d'autres buts que les capteurs thermiques, gravent les diélectriques et libèrent une structure de polysilicium [61, 62]. Néanmoins, le principe demeure le même.

Étant donné que cette gravure dissout une ou plusieurs couches du procédé de fabrication des circuits électroniques, cette étape doit être faite en post-fabrication. Les produits chimiques de gravure de la couche sacrificielle sont habituellement trop corrosifs pour les couches sensibles et on doit procéder à la libération de la structure en premier lieu.

Cette gravure ne nécessite aucun alignement, car elle se fait par l'entremise de trous ouverts sur l'aluminium laissés en surface, comme pour les carrés de connexion du circuit, et ainsi dans le respect total des règles de dessin CMOS (alors qu'il n'est pas permis de laisser le silicium non recouvert habituellement, comme avec la gravure anisotrope par la face avant). Après la gravure, la cavité visible en surface ne fait tout au plus que quelques microns, et on peut facilement y déposer et y mettre en forme une couche supplémentaire.

L'isolation thermique par les bras peut être maximisée par la mise en forme des bras, comme avec la gravure anisotrope par la face avant. Par contre l'isolation thermique dans l'air est très faible et domine : la distance entre la membrane et le substrat fait d'une fraction de microns à quelques microns tout au plus. Les contraintes dans les différentes couches peuvent mener à une déformation de la membrane. Cette déformation n'est pas plus importante que pour les autres techniques, mais son effet importe beaucoup plus étant donné les faibles «profondeurs de cavité»! Des couches de compensation peuvent être déposées, mais elles compliquent le procédé en nécessitant l'emploi de la lithographie et de la mise en forme afin d'ouvrir à nouveau les trous pour la gravure de la couche sacrificielle. Le chauffage de la membrane est limité ici à l'emploi de l'aluminium, avec les défauts que cela comporte, comme l'électromigration et une température de fusion peu élevée.

L'isolation thermique dans l'air de cette structure est faible et on limite donc cette technique aux capteurs de pression. La pression limite haute est très élevée étant donné la proximité du substrat et de la membrane, et peut même dépasser la pression atmosphérique [63]. La pression basse est quant à elle définie par l'isolation thermique par les bras, et ceux-ci peuvent être mis en forme. Ainsi, sans mise en forme particulière de la membrane, le groupe de l'ETH à Zurich a

présenté un capteur thermique qui offrait une lecture sur 6 ordres de grandeur de pression, en comptant un ordre de grandeur au-dessus de la pression atmosphérique [63].

Néanmoins, l'isolation thermique sous vide peut être comparable à celle obtenue avec la gravure anisotrope de face. Cela procure donc la possibilité de faire des capteurs de tension moyenne rms ou infrarouge, si le boîtier est gardé à une pression très faible.

Le tableau 3.6 résume les avantages et limites de la gravure sacrificielle de couches minces en surface du dé. Le tableau 3.7 dresse une liste de résultats obtenus à l'aide de cette technique.

Tableau 3.6 Avantages et désavantages des techniques traditionnelles la gravure sacrificielle de couches minces en surface du dé (sacrificielle)

Technique	Isolation thermique (vide)	Isolation thermique (air)	Distance substrat à membrane faible	Simplicité et robustesse du procédé	Simplicité du dépôt de couches supplémentaires
Sacrificielle	++	--	++	+	+

Légende : ++ : très bon ; + : bon ; = : moyen ; - : mauvais ; -- : très mauvais

Tableau 3.7 Résultats obtenus en utilisant la gravure sacrificielle de couches minces en surface du dé (sacrificielle)

Référence	Application	Isolation thermique (vide)	Isolation thermique (air)
[63]	Pression	50 μ W/K	410-1250 μ W/K
[48]	Pression	2 μ W/K	2000 μ W/K

3.6 Les autres techniques

D'autres techniques ont été développées mais ne peuvent être aspirées au statut fort objectif de traditionnelles à l'heure actuelle. Certaines de celles-ci sont présentées à la fin du chapitre prochain. La seule autre technique dont il sera question ici est la soudure de gaufre, car elle a fait l'objet d'un certain engouement.

La figure 3.11 présente à quoi pourrait ressembler un capteur thermique fait à l'aide de la soudure de gaufre. La gravure anisotrope serait d'abord utilisée pour définir une dépression dans le silicium, de profondeur libre. Une autre gaufre de silicium est collée à la gaufre de silicium, de façon à emprisonner la cavité. On amincit alors la gaufre ajoutée à quelques microns d'épaisseurs. On tente alors de voir les cavités sous la surface afin d'aligner le procédé de microélectronique commercial de façon à bien positionner le capteur sur la membrane.

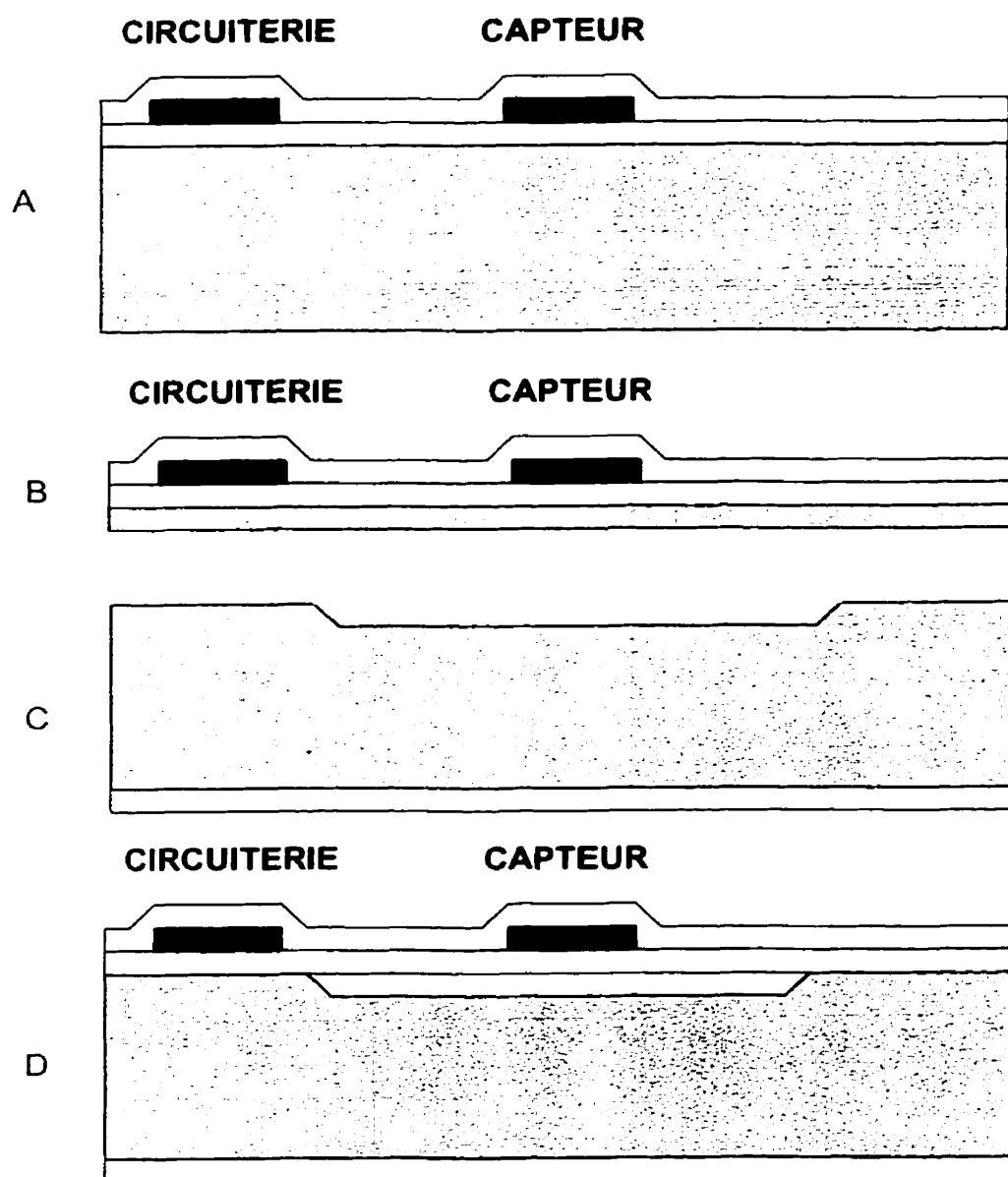


Figure 3.11 Utilisation de la soudure de gaufres et de l'amincissement de gaufres pour former des capteurs thermiques. A) Capteur en surface. B) Amincissement de la gaufre. C) Usinage de volume en surface d'une gaufre vierge. D) Collage des gaufres usinées et amincies.

Cette technique présente un grand avantage : la profondeur de la cavité est libre, elle est pratiquement indépendante de considérations géométriques. Cependant, elle souffre de plusieurs défauts. D'abord, elle est très complexe et nécessite des alignements fins. Ensuite, les fonderies commerciales acceptent rarement d'utiliser leurs procédés sur des gaufres de silicium qui ont déjà connu des étapes de procédé sur lesquelles leur contrôle n'est pas total. Enfin, la membrane est faite essentiellement de silicium, ce qui fait en sorte que l'isolation thermique n'est pas vraiment bonne. Cette technique n'est plus largement utilisée pour les capteurs thermiques, on s'en doutera.

Chapitre IV

Design proposé : concept et procédé de fabrication

Au chapitre précédent, les caractéristiques des différentes techniques et designs traditionnels pour les capteurs et actuateurs thermiques ont été décrits. On y a vu que la gravure anisotrope par le dos présentait des qualités fort intéressantes mais n'offrait pas l'isolation thermique maximale et pouvait rendre difficile les étapes de fabrication ultérieures. La gravure anisotrope de face, quant à elle, procure les meilleurs résultats en terme d'isolation thermique. Toutefois, les profonds trous visibles en surface rendent difficile le dépôt de couches après la gravure. La gravure sacrificielle, quant à elle, est la méthode la plus simple en termes de procédé et de plus, le dépôt de couches supplémentaires n'est pas rendu ardu par la présence de trous profonds. Par contre, l'isolation thermique y est de beaucoup inférieure aux autres dans l'air. Sous vide, par contre, une isolation thermique élevée peut être obtenue. Le tableau 4.1 dresse ces caractéristiques des différentes techniques.

Tableau 4.1 Avantages et désavantages des techniques traditionnelles, selon les besoins de différents capteurs thermiques

Technique/ Besoins	Isolation thermique (vide)	Isolation thermique (air)	Distance substrat à membrane	Simplicité et robustesse du procédé	Simplicité du dépôt de couches supplémentaires
Dos	+	+	--	=	+
Face	++	++	=	+	-
Sacrificielle	++	--	++	+	+

Légende : ++ : très bon ; + : bon ; = : moyen ; - : mauvais ; -- : très mauvais

4.1 Technique proposée : la structure à cavité enfouie

4.1.1 Présentation de la technique

Le tableau 4.1 illustre qu'aucune technique ne satisfait pleinement la liste des besoins exprimés dans le tableau. Par contre, on y remarque que si l'on pouvait tirer avantage de deux techniques simultanément, sans en tirer les désavantages, on pourrait peut-être alors obtenir les caractéristiques les plus enviables dans toutes les catégories.

La technique originale proposée ici est d'essayer d'utiliser deux de ces techniques coup sur coup de telle façon que les défauts amenés par une technique seront compensés sinon éliminés par les

avantages procurés par l'autre technique. Cette technique consiste à combiner la gravure sacrificielle et la gravure anisotrope de surface.

La figure 4.1 présente le procédé de fabrication, tant dans un procédé commercial qu'un procédé dédié. La figure 4.2 illustre le résultat final d'un tel procédé, avec quelques variantes. La vue de côté à la figure 4.2 montre que la cavité est cachée sous la membrane. Ceci permet de comprendre le nom suggéré pour cette nouvelle technique : la structure à cavité enfouie.

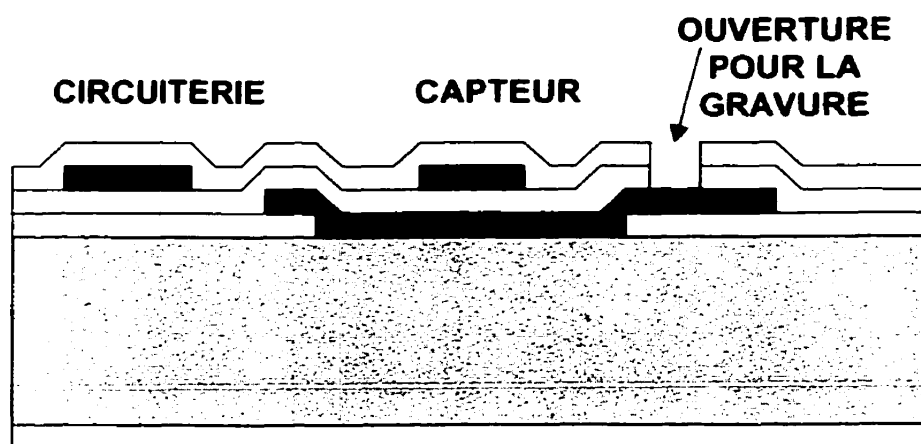


Figure 4.1 1) Procédé de fabrication pour la technique proposée. 1) Gaufre avec fabrication CMOS. Légende : Blanc : oxyde, Noir : aluminium, Gris : Silicium.

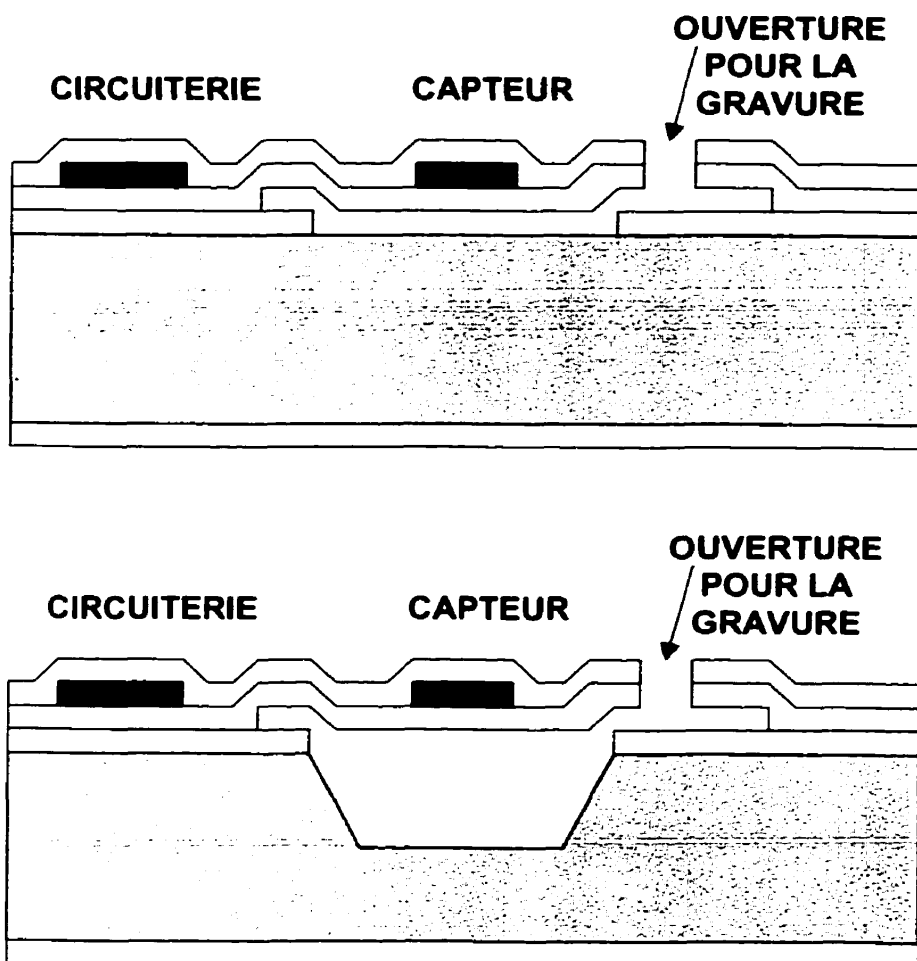


Figure 4.1 2) et 3) Procédé de fabrication pour la technique proposée. 2) gravure sacrificielle de la couche métallique du dessous : 3) plongeon dans un graveur anisotrope et gravure par la face avant (le graveur doit passer par le passage laissé par la gravure sacrificielle. L'angle de la gravure est de 54° . La gravure est arrêtée par l'atteinte du fond de la pyramide ou de la gaufre ou par retrait de la solution. Légende : Blanc : oxyde, Noir : aluminium, Gris : Silicium.

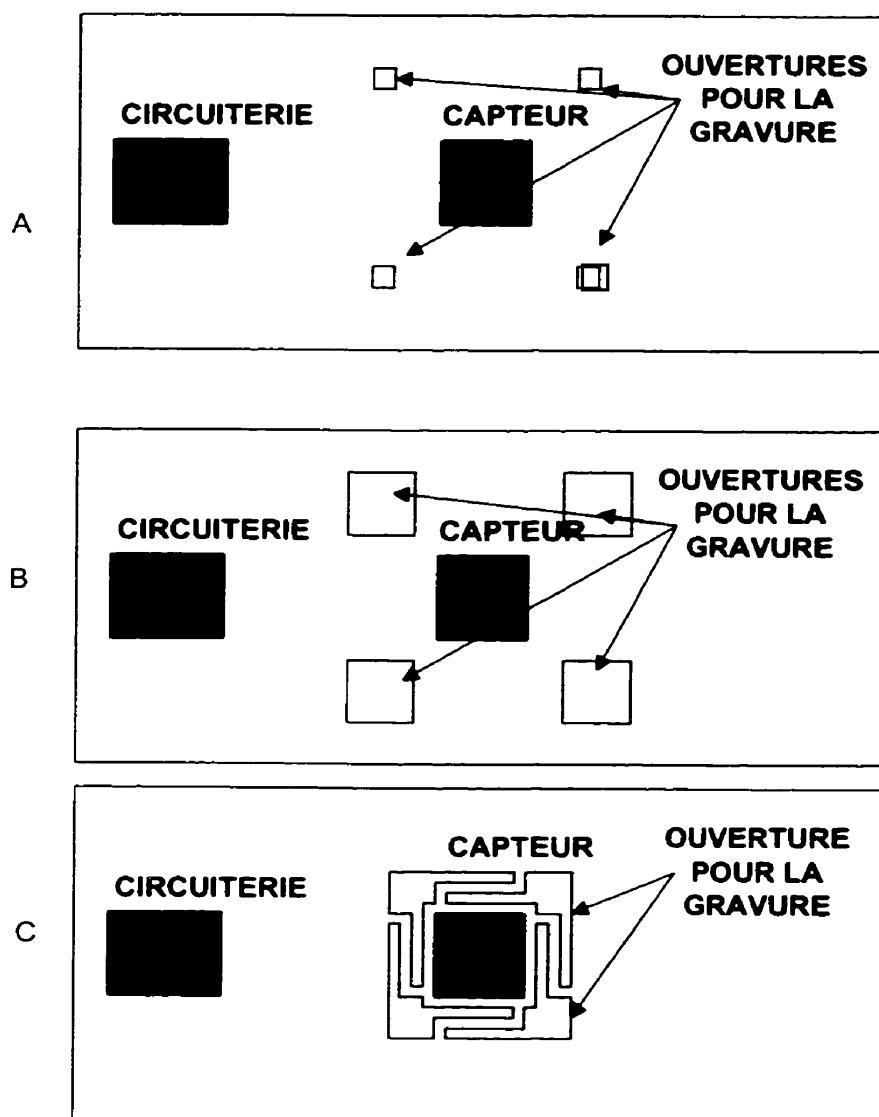


Figure 4.2 (1) Vue de haut d'un design fait en utilisant le procédé de la figure 4.1 (procédé proposé). Le trou profond n'est pas visible de la face avant. A) Structure avec ouvertures minimales. B) Structure en croix. C) Structure aux bras à géométrie complexe, de façon à allonger les bras.

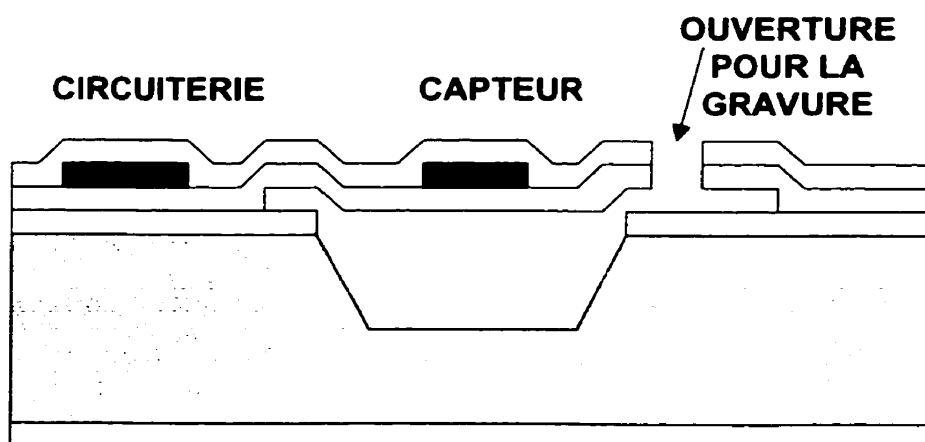


Figure 4.2 (2) Vue de côté, de face et de dos d'un design fait en utilisant le procédé de la figure 4.1 (procédé proposé). La gravure anisotrope peut être profonde ou peu profonde, au choix. On y voit que le trou profond n'est pas visible de la face avant.

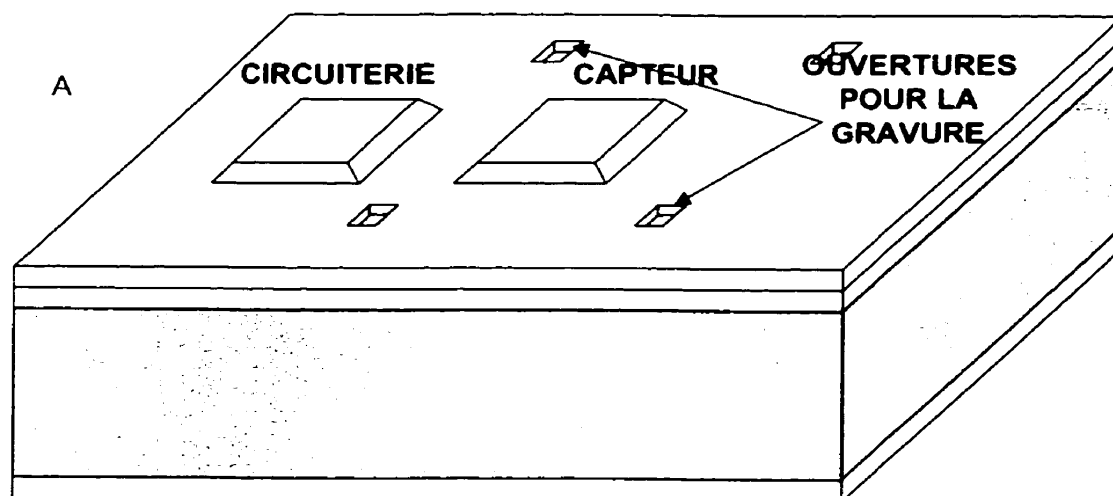


Figure 4.2 (3) Vue de haut et de côté d'un design fait en utilisant le proposé. Les trous profonds ne sont pas visibles de la face avant. A) Structure avec ouvertures minimales.

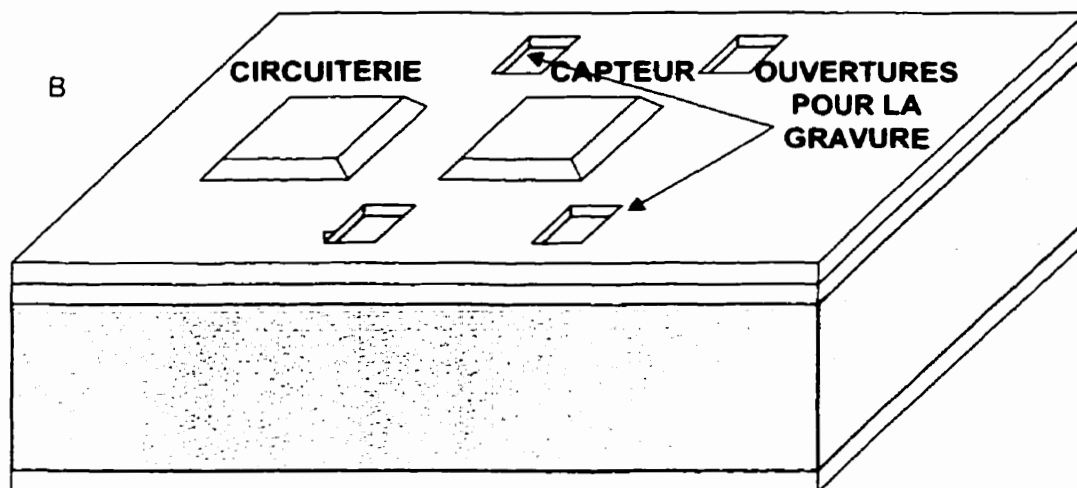


Figure 4.2 (3) Vue de haut et de côté d'un design fait en utilisant le proposé. Les trous profonds ne sont pas visibles de la face avant. B) Structure en croix.

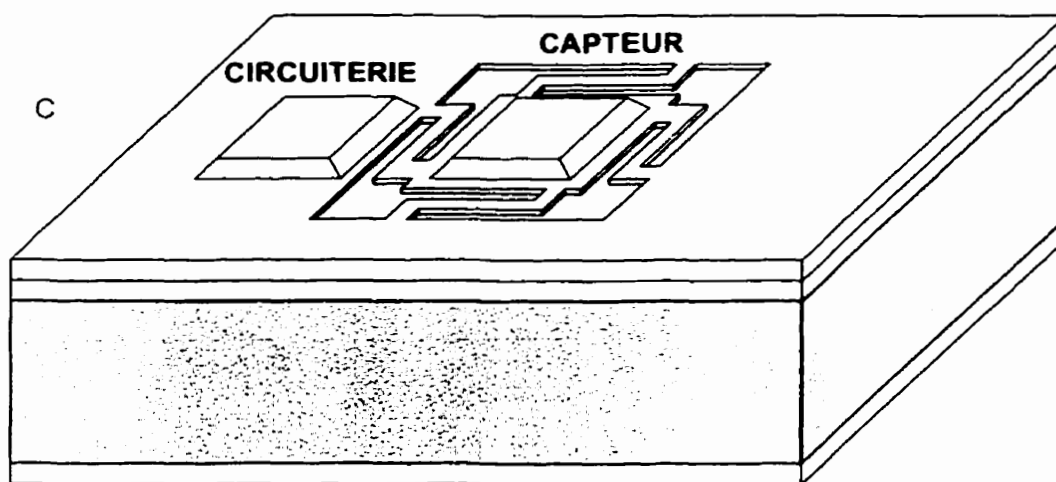


Figure 4.2 (3) Vue de haut et de côté d'un design fait en utilisant le proposé. Les trous profonds ne sont pas visibles de la face avant. C) Structure aux bras à géométrie complexe, de façon à allonger les bras.

À la figure 4.1, le procédé de fabrication est décrit. L'empilement de couche, après fabrication commerciale (ou fabrication maison) est le suivant, du bas vers le haut :

- silicium (substrat)
- oxyde
- métal (couche sacrificielle)
- isolant
- métal (couche conductrice utile pour le chauffage ou la mesure de la température)
- isolant

Les couches métalliques et isolantes sont mises en forme de façon telle que 1) la couche sacrificielle de métal a des ouvertures à la gravure en surface, que 2) l'oxyde est retiré entre le métal de gravure sacrificielle et le silicium pour les régions pour lesquelles la gravure anisotrope de face est désirée et que 3) les régions des parties 1) et 2) sont différentes. La troisième requête a pour conséquence d'assurer que les trous laissés par la gravure sacrificielle seront de profondeur minimale, tel que vu par la face avant. Cette troisième requête peut toutefois être négligée si la gravure anisotrope de la cavité ne s'effectue que sur quelques microns et que cela n'affecte pas les étapes ultérieures. Le cas A de la figure 4.2 est un exemple pour lequel les trois requêtes sont remplies.

Après la fabrication commerciale, on grave la couche sacrificielle complètement. Ceci a pour conséquence fondamentale que toute la région de silicium qui subira la gravure anisotrope est

exposée dès le début de la gravure. On passe alors à la gravure anisotrope. On peut faire la gravure jusqu'à ce que la pyramide soit formée ou on peut arrêter la gravure après la gravure d'une profondeur déterminée.

La profondeur de la cavité n'est pas uniquement déterminée par la géométrie de la cavité. C'est probablement l'avantage le plus grand de cette technique en comparaison avec les autres (on exclut la technique complexe et peu prometteuse qui utilise la soudure de gaufre et l'amincissement). En effet, contrairement à la gravure anisotrope de face, la profondeur peut être choisie puisque la gravure en profondeur commence au même moment sur toute la surface. Il est possible de choisir une profondeur de seulement quelques microns si l'application l'exige, peu importe la surface de la membrane. On peut aussi préférer graver la pyramide inversée en sa totalité.

Les graveurs de la couche sacrificielle dépendent du métal utilisé. Dans les procédés commerciaux actuels dont la technologie tourne autour de $1\text{ }\mu\text{m}$, le matériau est habituellement fait d'aluminium. Les graveurs de l'aluminium peuvent être les solutions suivantes : graveur commercial d'aluminium (à base d'acides potassique, nitrique et acétique), graveur Krumm et acide chlorhydrique avec un peu de peroxyde d'hydrogène [64.65]. Le dernier est le plus rapide des trois et fut utilisé avec succès. Pour la gravure anisotrope, on pourra utiliser le KOH ou le TMAH. Le TMAH sera préféré pour éviter que des ions K^+ viennent se loger à l'intérieur de la circuiterie électronique et en perturbent le comportement [3].

La solution de TMAH, si elle n'est pas modifiée, grave aussi l'aluminium. Cependant, il n'est pas recommandé de l'utiliser dans ce double emploi parce qu'alors, la gravure anisotrope du

silicium pourrait commencer avant la fin de la gravure sacrificielle de l'aluminium. Ceci aurait pour effet que la profondeur de la gravure anisotrope ne serait pas uniforme sur toute la surface (la profondeur sur les extrémités serait plus grande qu'au centre). Un des plus grands intérêts de cette technique serait alors perdu.

En termes de procédé, la difficulté principale réside dans la protection des carrés de connexions sur lesquels les fils seront collés, qui sont fait du même métal que celui gravé. Des techniques de protection existent, comme la passivation électrochimique [66] qui ne nécessite pas le dépôt d'une nouvelle couche. Une autre solution est de déposer une couche de résine photosensible mise en forme grossièrement de façon à protéger les plots métalliques durant la gravure sacrificielle. Pour la gravure anisotrope suivante, il s'agira de modifier la solution de TMAH de façon telle qu'elle ne grave plus l'aluminium [66]. Une solution fort pratique consiste à protéger les plots métalliques avec les "balles" d'or électroplaqués lors de l'étape post-procédé de la mise en boîtier [67]. Ces balles d'or servent à assurer le contact dans le cas des circuits mis en "flip-chip".

Le tableau 4.2 compare les avantages et désavantages estimés (avant analyse) de la technique de la cavité enfouie avec ceux des techniques traditionnelles.

Tableau 4.2 Avantages et désavantages de la technique de la cavité enfouie

Technique	Isolation thermique (vide)	Isolation thermique (air)	Distance substrat à membrane faible	Simplicité et robustesse du procédé	Simplicité du dépôt de couches supplémentaires
Dos	+	+	--	=	+
Face	++	++	=	+	-
Sacrificielle	++	--	++	+	+
Cavité enfouie	++	++ *	++ *	+	+

Légende : ++ : très bon ; + : bon ; = : moyen ; - : mauvais ; -- : très mauvais

**Les résultats de l'isolation thermique dans l'air et de la distance membrane à substrat devraient être l'inverse l'un de l'autre. En fait, avec la technique à cavité enfouie, il est possible d'obtenir soit une bonne isolation thermique sous air, soit une distance membrane à substrat faible.*

4.1.2 Variations autour de la même structure

La figure 4.2 présente quelques variantes de design possibles en utilisant le procédé de fabrication. Les variantes sont surtout reliées à la possibilité de mettre en forme l'empilement de couches de façon à optimiser l'isolation thermique de la structure pour l'application recherchée.

Dans les cas B) et C), il s'agit d'allonger les bras pour diminuer la conduction thermique sous vide dans les bras en comparaison avec la conduction thermique entre la membrane et le substrat. Dans les deux cas, la gravure anisotrope de face est effectuée sous la membrane. La distance entre les bras et le substrat est donc faible (un ou quelques microns), ce qui réduit la résistance thermique des bras sous air.

Une première solution est de réduire la surface des bras, comme dans le cas c), pour laquelle les bras sont de largeur minimale. Une autre solution est d'utiliser des bras plus larges et d'effectuer une gravure anisotrope sous les bras. Dans ce cas, il faut toutefois laisser un espace entre l'ouverture à la gravure sous les bras et sous la membrane afin de ne pas donner libre cours à la sous-gravure (la gravure anisotrope grave le plus grand rectangle possible, cf chapitre 3).

4.2 Structures apparentées

Au cours des dernières années, quelques techniques ont été proposées afin de procéder à la gravure du silicium à partir de la face avant. Ces techniques n'étaient pas destinées aux capteurs thermiques. Cependant, puisque ces techniques consistent, elles aussi, à faire usage de la gravure de couches en surface (pas nécessairement sacrificielle) avant la gravure du silicium (pas toujours anisotrope), cette section s'attarde à présenter et comparer brièvement ces techniques. Une autre technique enfin, qui utilise la gravure sacrificielle en surface et la gravure anisotrope, mais du dos cette fois, est aussi illustrée.

La première technique se nomme SCREAM, un acronyme de "Silicon crystal reactive etching and metallization". Il s'agit ici de mettre en forme un oxyde en surface et de graver de façon

directionnelle quelques microns de silicium, par gravure plasma RIE. Par la suite, on recouvre les parois gravées d'oxyde, mais non le bas de cavité. Enfin, on grave encore le silicium par plasma de façon isotrope, jusqu'à ce que les différentes cavités ne forment plus qu'une sous la surface. La figure 4.3A, à la fin de ce chapitre illustre ce procédé.

La technique SBM [68] (Surface/bulk micromachining) n'est en fait que le procédé SCREAM pour lequel on remplace la gravure plasma finale du silicium par la gravure humide anisotrope. On peut alors tirer parti de l'anisotropie de la gravure. Cependant, pour en tirer vraiment profit, la gaufre doit être de type $\{111\}$, ce qui n'est pas le type des gaufres utilisées dans la fabrication CMOS. La figure 4.3B montre ce procédé.

Ces deux techniques ont pour principal objectif de faire en sorte que la membrane est faite de silicium cristallin. Cela garantit l'obtention d'une membrane avec des contraintes internes minimales. Cependant, la profondeur minimale de la gravure sous la membrane est fonction de la géométrie de la structure et ne peut être limitée à quelques microns. De plus, toutes les cavités sont visibles de la face avant.

Le groupe des MEMS de l'Université Carnegie-Mellon propose aussi l'emploi des plasmas pour la gravure [69]. Dans leur cas, c'est la couche de métal la plus élevée (métal 3, par exemple), qui sert de masque à la gravure anisotrope de l'oxyde jusqu'au silicium. Par la suite, une gravure gazeuse isotrope du plasma est effectuée. La figure 4.3C esquisse ce procédé.

Cette technique présente plusieurs avantages, dont la compatibilité avec les procédés CMOS, la relative simplicité et la présence possible du polysilicium dans la structure suspendue sont les plus importants. Par contre, encore ici, la profondeur de la cavité est dépendante de la géométrie

et peut difficilement être propagée à plusieurs dizaines de microns, car la gravure du silicium est isotrope. Enfin, toutes les cavités sont visibles de la face avant.

Une autre technique consiste à rendre le silicium poreux sous la membrane [70]. On ouvre des ouvertures en surface et on rend le silicium poreux par gravure électrochimique. La profondeur de la gravure électrochimique, comme sa diffusion sur les côtés, peut être contrôlée. Ensuite, un graveur anisotrope du silicium dissout le silicium poreux. La figure 4.3D présente ce procédé.

Une technique complexe fait appel au polissage chimico-mécanique (CMP) [71]. Elle consiste à graver un trou de la forme et de la profondeur désirée, puis de remplir le trou par un oxyde. Le dépôt doit être d'épaisseur au moins égale à la profondeur de la cavité. Ensuite, on utilise le polissage chimico-mécanique pour égaliser la surface du silicium et de l'oxyde ajouté. On poursuit la microfabrication du capteur, c'est-à-dire que l'on dépose les couches de polysilicium, métal et oxyde de la membrane suspendue. Enfin, on libère la membrane en gravant l'oxyde déposé au début du procédé. La figure 4.3E expose ce procédé.

Il est possible avec ce procédé de limiter la profondeur des cavités vues en surface et de faire en sorte que la cavité ait la profondeur désirée. Cependant, ce procédé n'est pas du tout compatible CMOS. De plus, la profondeur de la cavité est pratiquement limitée par l'épaisseur d'oxyde que l'on peut déposer dans la cavité.

L'avantage de cette technique est d'offrir la possibilité de faire une gravure à une profondeur donnée. Par contre, cette profondeur sera au minimum égale à la distance entre deux ouvertures en surface et les trous profonds sont visibles de la surface.

Une autre technique utilise aussi la gravure sacrificielle et la gravure anisotrope de face [72, 73]. Avec cette technique, illustrée à la figure 4.3F, un groupe japonais désirait faire des capteurs mécaniques de pression – en utilisant les propriétés piézorésistives du silicium. Toutefois, la couche sacrificielle gravée est le polysilicium. Ceci a pour désavantage que la gravure isotrope du polysilicium et la gravure anisotrope du silicium ont lieu simultanément, ce qui fait en sorte que la gravure sur les premières régions exposées du silicium cristallin sera plus profonde que sur d'autres régions plus éloignées (au centre, par exemple). Il n'est donc pas possible de contrôler la profondeur atteinte par la gravure anisotrope. Un des avantages importants de la structure à cavité enfouie proposée ici est alors perdu. On retrouve cependant un avantage semblable : les risques de concentration de contraintes lors de la gravure sous la structure suspendue sont éliminés. Il est à noter toutefois que les concepteurs du capteur de pression ne cherchaient pas à limiter la profondeur de la gravure : elle se déroule aussi profondément que la gravure anisotrope le permet. Pour les auteurs, il s'agissait de boucher le trou après la fabrication afin de conserver la zone gravée à une pression de référence.

Pour le design de valves thermiques, on fait souvent appel à la gravure sacrificielle de surface et la gravure anisotrope par le dos [74]. La valve est libérée en gravant la couche sacrificielle de polysilicium par la face avant et le trou est formé en gravant par le dos jusqu'aux oxydes de la membrane sur la face avant. Dans ce cas, l'emploi des deux techniques permet de définir un «bouchon» de valve plus grand que le trou à boucher, et donc une valve de bonne qualité. Cette technique présente plusieurs des avantages de la structure à cavité enfouie, mais aussi un grand désavantage qui lui est propre : il est nécessaire de faire une lithographie sur la face arrière pour graver la cavité. La gaufre est plus fragile et la distance entre la membrane et le substrat n'est

plus bien définie. Une telle valve est présentée à la figure 4.3G. Il est à noter que la technique proposée ici pourrait être utilisée pour une valve thermique. Il en sera question au chapitre 6. Certains utilisent aussi cette technique pour faire des capteurs de pression [75].

Enfin, cette liste non exhaustive de procédés de microfabrication alliant la gravure en surface et la gravure du silicium développés de par le monde montre que la structure proposée ici s'inscrit bien dans le développement de nouvelles structures pour répondre à des besoins spécifiques de certaines applications.

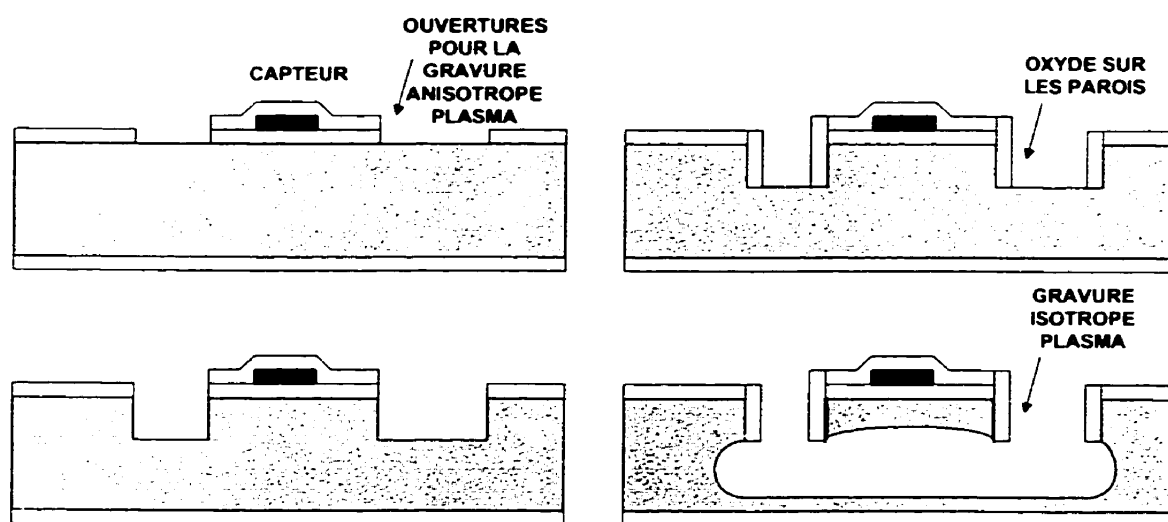


Figure 4.3 A) Structures apparentées. A) Procédé SCREAM. On ouvre le masque d'oxyde en surface pour faire une gravure anisotrope du silicium. On couvre les parois de la cavité d'oxyde. Enfin, on effectue une gravure plasma isotrope du silicium. Légende : Blanc : oxyde, Noir : aluminium, Gris : Silicium.

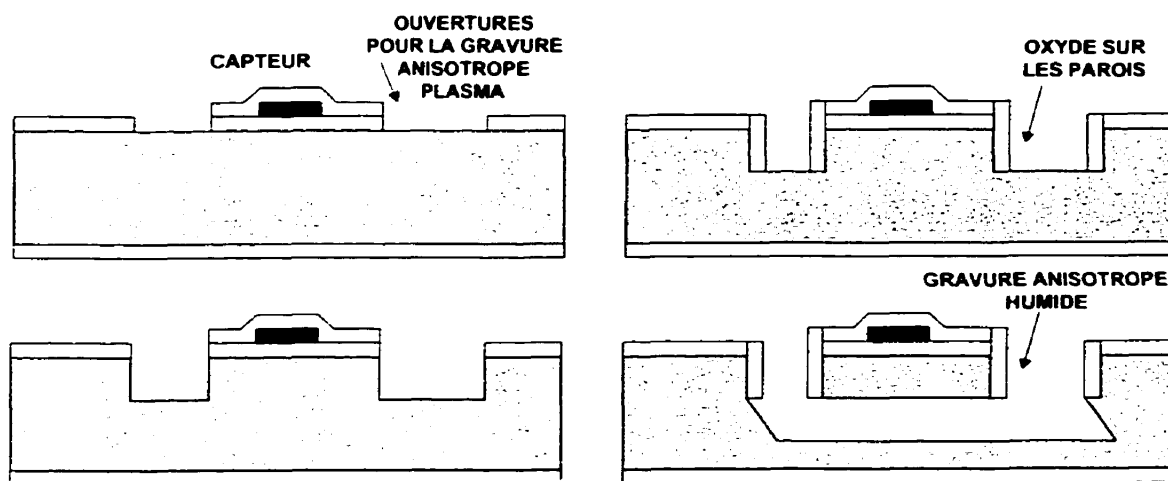


Figure 4.3 B) Structures apparentées. B) Procédé SBM. On ouvre le masque d'oxyde en surface pour faire une gravure anisotrope du silicium. On couvre les parois de la cavité d'oxyde. Enfin, on effectue une gravure anisotrope humide du silicium. La gaufre est de type $\{111\}$.

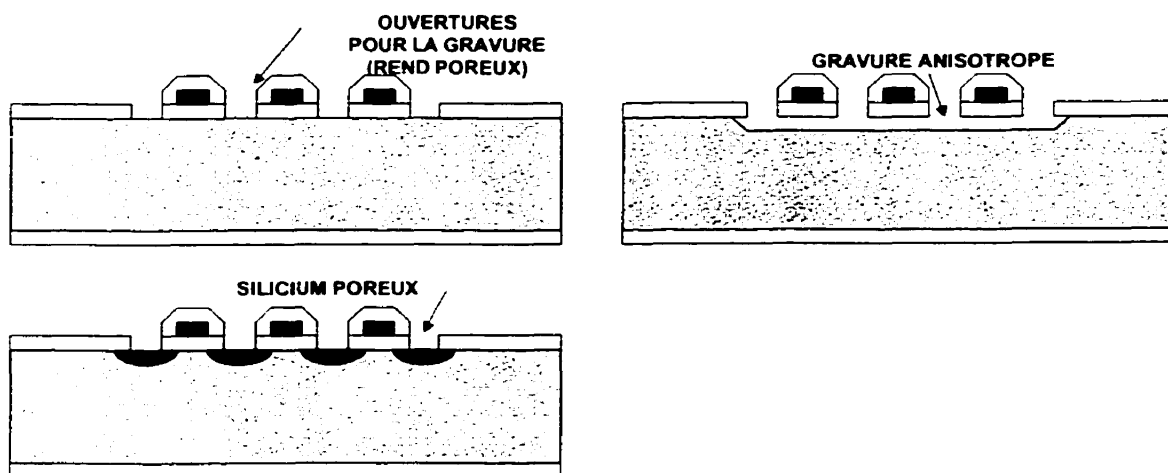


Figure 4.3 C) Structures apparentées. C) Procédé à base de silicium poreux. Des trous sont percés dans l'oxyde pour permettre la gravure électrochimique du silicium pour le rendre poreux. On fait ensuite une gravure anisotrope humide.

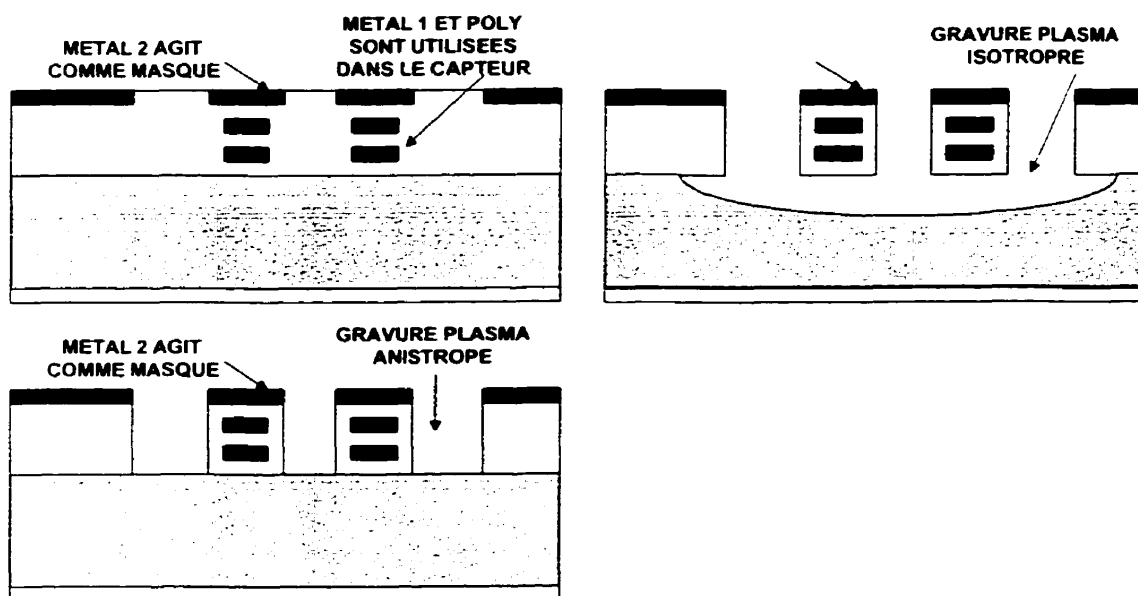


Figure 4.3 D) Structures apparentées. D) Procédé de l'Université Carnegie-Mellon. La couche de métal supérieure sert de masque à la gravure anistrophe des oxydes. Ensuite, on effectue une gravure plasma isotrope du silicium. Légende : Blanc : oxyde, Noir : aluminium, Gris : Silicium.

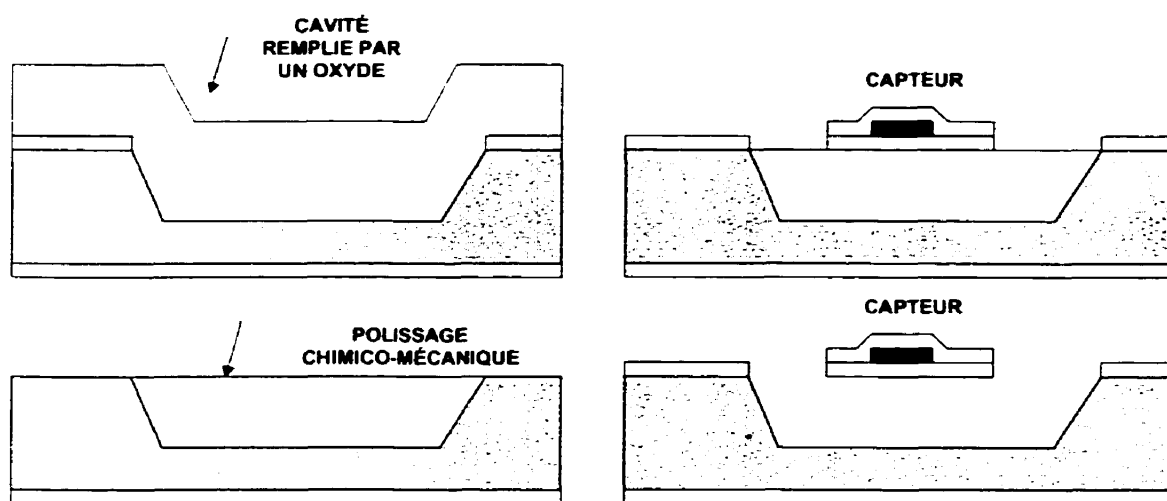


Figure 4.3 E) Structures apparentées. E) Emploi du polissage CMP. On grave une cavité dans le substrat de silicium que l'on remplit ensuite d'oxyde. Le polissage CMP égalise les surfaces de silicium et d'oxyde. On fabrique ensuite la capteur et on effectue une gravure sacrificielle de l'oxyde de la cavité.

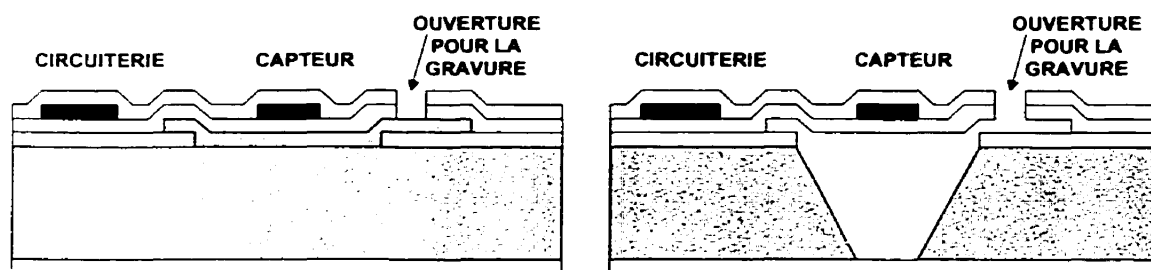


Figure 4.3 F) Structures apparentées. F) Capteur de pression piézorésistif formé par gravure sacrificielle et gravure anisotrope par la face avant. Le même matériau est utilisé comme couche sacrificielle et pour la gravure de volume (silicium). La profondeur de la gravure ne peut donc pas être limitée à quelques microns.

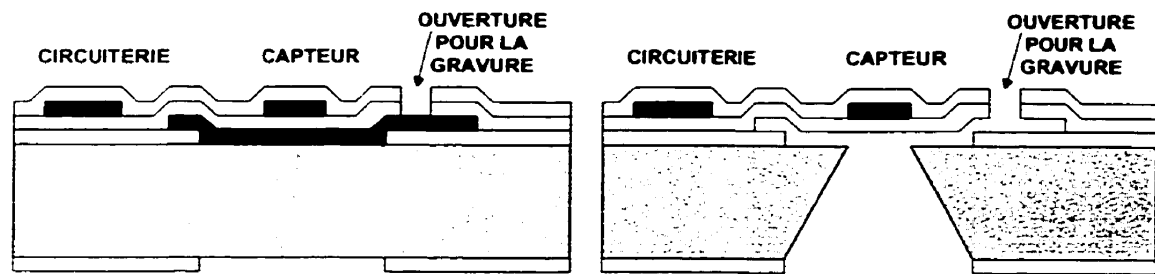


Figure 4.3 G) Structures apparentées. G) Valve thermique formée par gravure sacrificielle et gravure anisotrope par la face arrière. Légende : Blanc : oxyde, Noir : aluminium, Gris : Silicium.

Chapitre V

Résultats

Au cours de ce chapitre, nous analyserons le nouveau design proposé au chapitre 4 en fonction des considérations de design exprimées au chapitre 2.

Les designs sous étude sont ceux qui sont présentés à la figure 4.2 : la structure en croix (4.2 B) et la structure aux bras plus complexes (4.2 C).

Au cours de ce chapitre, les dimensions typiques sont les suivantes, à moins d'indication contraire dans le texte :

Nature du métal :	aluminium
Nature du diélectrique :	oxyde de silicium
Épaisseur du diélectrique (haut, bas) :	1 μm chacun
Épaisseur du métal :	1 μm
Largeur minimale des lignes de métal :	1,5 μm
Largeur des bras de diélectrique :	50 μm
Longueur des bras :	100 μm (croix (B)), 200 μm (bras complexes (C))
Côté de la membrane centrale :	200 μm

Distance entre la membrane et le substrat : $5\mu m$

5.1 Analyse thermique

En ce qui concerne l'analyse thermique, les deux designs sont semblables. Ils sont formés d'une membrane centrale sur laquelle repose le capteur ou l'élément chauffant et de bras qui relient la membrane au substrat.

5.1.1 Conduction thermique sous vide

Sous vide, on néglige la convection et la conduction dans les gaz. La conduction ne s'opère que dans les bras. Si la radiation peut être négligée, comme c'est souvent le cas (voir le chapitre 2), la conduction thermique se produit essentiellement dans les bras. En utilisant la relation 2.9 et les propriétés physiques énoncées au chapitre 2, on calcule la conduction thermique des bras :

$$\begin{aligned}
 G_{TH, TOTAL} &= \sum_i k_i \frac{w_i e_i}{l_i} \\
 &= k_{metal} \frac{w_{metal} e_{metal}}{l_{metal}} + k_{diel} \frac{w_{diel} e_{diel}}{l_{diel}} \\
 &= 2 \cdot 250 W / mK \cdot \frac{1\mu m \cdot 1.5\mu m}{100\mu m} + 4 \cdot 1 W / mK \cdot \frac{2\mu m \cdot 50\mu m}{100\mu m} \\
 &= 7.5\mu W / K + 4\mu W / K \\
 &= 11.5\mu W / K
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Cette conductance thermique de $11.5\mu W/K$ dans le vide équivaut à une résistance thermique de $87\,000\, K/W$. Cette mesure, bien que théorique, se compare avantageusement avec l'isolation thermique sous vide de capteurs obtenus par d'autres méthodes.

On voit que si la technologie employée est fixée (matériau, largeur minimale et épaisseur déterminés), la seule variable qui permette d'améliorer la conduction thermique est la longueur. On peut diminuer la conduction dans les bras en allongeant les bras. La structure à bras allongés complexes est une méthode pour allonger les bras tout en limitant la surface totale du capteur.

5.1.2 Conduction dans l'air

Pour tenir compte de la conduction dans l'air, il faut maintenant ajouter la conduction entre la membrane et le substrat puis faire la correction de la conduction des bras sous vide pour tenir compte de la conduction dans le gaz.

La conduction sous la membrane est simplement :

$$G_{MEMBRANE..AIR} = \frac{k_{AIR} \cdot A_{MEMBRANE}}{d_{GAP}} = \frac{25mW / mK \cdot (200\mu m)^2}{5\mu m} = 200\mu W / K \quad (5.2)$$

Pour la conduction dans l'air sous les bras, le terme de correction α de la relation 2.26 est :

$$\alpha = \sqrt{\frac{(\epsilon \sigma T_{SUB}^3 + \frac{k_{AIR}}{d_{GAP}}) A_{BRAS}}{G_{BRAS,VIDE}}} = \sqrt{\frac{\frac{25mW / mK}{5\mu m} (4 \cdot 100\mu m \cdot 50\mu m)}{11,5\mu W / K}} = 2,9 \quad (5.3)$$

La conductance thermique dans les bras est donc de

$$G_{BRAS..AIR} = G_{BRAS,VIDE} \alpha \cdot \coth(\alpha) = 11,5\mu W / K \cdot 2,9 \cdot \coth(2,9) = 33\mu W / K \quad (5.4)$$

La conductance thermique totale atteint :

$$G_{TOT} = G_{BRAS.AIR} + G_{MEMBRANE.AIR} = 233 \mu W / K \quad (5.5)$$

Cette conductance thermique correspond à une résistance thermique de 4300 K/W, ce qui est assez faible. Dans le cas des capteurs de gaz et infrarouge, on veut diminuer la conduction thermique. On y arrive en diminuant la surface du capteur certes, mais on perd alors en sensibilité, car le capteur est plus petit. Par contre, on voit que la conduction dans l'air domine pour une taille de 200µm de côté. Si on réduit la taille à 100µm de côté, on diminue la conduction dans l'air entre la membrane et le substrat de 75% à 50µm/K. On peut aussi augmenter la distance entre la membrane et le substrat. Pour ce faire, pour la structure en croix, on peut faire graver sous les bras de la même façon que l'on grave sous la membrane.

La résistance thermique de 4300 K/W sous air est faible en comparaison avec les valeurs mesurées de Reay et Klaassen [50] de 53000 K/W, obtenu en utilisant la gravure anisotrope de surface. Avec la même technique, un groupe de l'Université de l'Alberta a mesuré des résistances thermiques de 250 000 K/W sous vide et de plus de 100 000 K/W sous air [30]. Van Herwaarden a conservé du silicium dans sa membrane et n'a réussi à obtenir que 800 à 2500 K/W [17]. Ces trois derniers ont utilisé la gravure anisotrope. En utilisant la gravure sacrificielle, le groupe de ETH Zurich a mesuré 20 000 K/W sous vide et de 1000 à 2000 K/W sous air [63], tandis que le groupe de Taiwan a obtenu 500 000 K/W sous vide mais aussi seulement 600 K/W sous air [48].

En résumé, sous vide, la conduction thermique peut être limitée à des niveaux très bas. Sous air, la proximité de la membrane fait en sorte que la conduction dans l'air y est plus élevée que dans le cas d'un capteur produit par gravure anisotrope par la face avant. Par contre, la technique

offre des résistances thermiques supérieures à ce que l'on trouve dans les autres cas de gravure sacrificielle sur la face avant.

5.2 Considérations mécaniques

Les propriétés mécaniques des procédés commerciaux sont peu connues. Des chiffres comme ceux du tableau 2.2 sont malheureusement peu disponibles et peu d'études ont publié les variations des propriétés mécaniques et des contraintes résiduelles dans les couches minces des procédés commerciaux de fabrication en microélectronique.

La déformation causée par les contraintes résiduelles des couches est la principale préoccupation mécanique du design. Lors de la formation de la structure par gravure, ces contraintes résiduelles arrivent à se libérer et à déformer la surface de la membrane et des bras.

L'étude qui sera faite ici est comparative. On a vu plus tôt que les capteurs de pression du groupe de Shie [48] tendent à une distance membrane à substrat de $0,3\mu\text{m}$. C'est donc dire que pour un pont de $100\mu\text{m}$ avec une telle distance membrane à substrat, si on accepte une variation dans la distance de 50% après libération de la structure, la déformation ϵ ne doit pas dépasser quelques 2 à 3 ppm, soit une contrainte tensile ou une contrainte compressive largement inférieure à un MPa. Si, comme c'est le cas avec le groupe de ETH Zurich [63], la distance initiale est de $1\mu\text{m}$ tout au plus, la déformation admise atteint 25ppm ou quelques MPa. Dans les deux cas, les contraintes doivent être très faibles (le tableau 2.2 montre des contraintes typiques beaucoup plus élevées).

Dans le cas de la structure proposée ici, on peut choisir une distance initiale de $1\mu\text{m}$ si l'on sait que l'empilement des couches est en contrainte tensile (tire sur le substrat lorsque l'empilement est relâché) et que la structure ne se déformera pas. Toutefois, pour se protéger face à des contraintes compressives, on peut amener la distance membrane à substrat à $5\mu\text{m}$ – la déformation maximale devient alors 0.06% – ou même à $20\mu\text{m}$ – ϵ peut atteindre 1% et les contraintes résiduelles quelques centaines de MPa.

Une distance membrane à substrat plus grande se traduit directement par une pression maximale mesurable moins élevée pour un capteur thermique de pression. Néanmoins, la technique proposée ici ne nécessite pas le dépôt et la mise en forme de couches de compensation, tout en offrant une distance membrane à substrat de quelques microns ou dizaines de microns, au choix du concepteur et non en fonction de la géométrie de la structure.

Dans un tout autre ordre d'idée, il est pertinent de s'attarder aux problèmes mécaniques qui surviennent en cours de fabrication. Au chapitre 3, la gravure anisotrope effectuée à partir de la face avant a été présentée et le problème potentiel de la concentration de contraintes sous un pont, une membrane ou un cantilever a été soulevé, de même que des solutions à ce problème. Un des avantages importants en termes de fiabilité et de rendement de fabrication du procédé de fabrication proposé ici est que la technique est totalement immunisée contre ces concentrations de contraintes, peu importe la géométrie de la structure. En effet, la gravure anisotrope est toujours dirigée vers le bas, jamais horizontalement sous la membrane. La gravure horizontale est prise en charge par la gravure sacrificielle de la couche métallique. Cette gravure est isotrope et ne génère pas de concentration de contraintes sous la structure suspendue.

5.3 Considérations thermomécaniques

On le répète, les propriétés mécaniques des couches sont peu connues. La déformation causée par les différences de coefficient d'expansion thermique entre le métal et le substrat est complexe pour les raisons suivantes : on imbrique le métal entre deux couches de diélectrique et ce diélectrique, l'oxyde de silicium, est souvent fait de plusieurs couches diélectriques de propriétés différentes et qui ont pour effet de rendre planes la surface, de limiter les problèmes dus aux contraintes, etc., et les propriétés des couches, leurs épaisseurs, sont méconnues. La couche métallique est souvent faite d'un ensemble de couches elle aussi.

Au chapitre 2, on a vu qu'un cantilever bilame fait de couches d'aluminium et d'oxyde de silicium d'un micron d'épaisseur et de 200 μ m de long chauffé de 100°C peut entraîner une déformation de 4 μ m vers le bas (aluminium dessus). Un chauffage 10 fois moins intense à 10°C, plus typique des capteurs de pression, donnerait tout de même 0.4 μ m. Les contraintes thermiques ne sont donc pas négligeables.

La technique proposée ici ne permet pas de réduire les effets des contraintes thermiques. En fait, elles contribuent à les accentuer d'une certaine façon en préconisant l'emploi de couches dont les coefficients d'expansion thermique sont très différents, l'aluminium et l'oxyde de silicium. Par contre, la technique permet de réduire l'effet relatif de la déformation sur la distance membrane à substrat. Une variation de 0.1 μ m en cours d'opération a moins d'effet sur une distance de 5 μ m (2%) que 1 μ m (10%).

Enfin, dans tous les cas, il est suggéré d'opérer les capteurs chauffés à température constante, si c'est possible. Ainsi, la déformation thermique sera toujours constante en cours d'opération.

5.4 Considérations thermoélectriques

Au chapitre 2, on a montré que la résistance métallique devait être dessinée selon le serpentin le plus dense possible. En utilisant un serpentin, la température maximale respectant les consignes des fonderies commerciales pour l'électromigration (1mA/μm typiquement, pour une durée de vie de 20 ans à température de la pièce: la valeur baisse si la température augmente) pour la structure typique est obtenue avec la relation :

$$T_{SERPENTIN} = \frac{P_{MAX,SERPENTIN}}{G_{THERM,SERPENTIN}} = \frac{K^2 R_c}{2} AR_{THERM,SERPENTIN} \quad (5.6)$$

Avec les résistances thermiques de 87000 K/W sous vide et de 4300 K/W dans l'air, on obtient pour une membrane de 200μm de côté et une résistance électrique par carré de métal de 40mΩ, 3.5°C sous air et 70°C sous vide. C'est très peu. L'utilisation de cette structure n'est donc pas pratique pour le chauffage si on respecte les règles de design pour l'électromigration. Toutefois, ces règles sont conservatrices. Si on fait usage de certaines précautions, comme de ne pas utiliser le capteur en continu mais en mode pulsé, si on fait en sorte qu'un courant alternatif circule dans les deux sens pour contrebalancer les effets négatifs de l'électromigration, on peut limiter le courant non pas à 1mA/μm, mais à 5 ou 10 mA/μm. Moyennant toutes ces réserves, il est alors possible d'amener la membrane à une température d'environ 100°C sous air, ce qui est suffisant pour une certaine classe de capteurs [5].

Cette température peut être augmentée en allongeant les bras pour améliorer l'isolation thermique ou en agrandissant la surface chauffée de la membrane. Toutefois, lorsque les dimensions de la structure s'accroissent, les effets mécaniques et thermomécaniques présentés plus haut deviennent de plus en plus importants.

Les autres considérations thermoélectriques proviennent de la nature du conducteur lui-même. L'électromigration, qui limite le courant qui peut être transmis à la membrane, a déjà été mentionnée. De plus, la résistance électrique de l'aluminium est faible, ce qui, avec la limitation pour le courant, fait en sorte que la puissance thermique maximale est peu importante. D'autre part, la conductivité thermique est élevée, ce qui diminue la température possible pour la puissance thermique. Enfin, une dernière considération concerne la température de fusion de l'aluminium, qui est peu élevée. On recommande habituellement de garder l'aluminium à une température sous 400°C.

Cette technique sera donc plus appropriée avec l'apparition de nouveaux conducteurs comme le cuivre. On peut aussi penser à déposer soi-même l'élément chauffant, du platine ou du polysilicium déposé par ECR-PCVD à basse température (il y a tout de même de l'aluminium dans les couches inférieures), afin d'obtenir des résistances électriques et thermiques plus élevées. Ceci se fait aux dépens de la simplicité de la méthode.

5.5 Considérations électrostatiques (électromécaniques)

Les considérations électromécaniques sont négligeables pour le design présenté ici, si la gravure anisotrope est de l'ordre de 5µm ou plus. Toutefois si la couche sacrificielle et la couche isolante sont peu épaisses et que la gravure anisotrope est très peu profonde, sinon nulle, l'effet

doit être considéré. Par exemple, si on cherchait à suivre la philosophie du groupe de Shie ($0.3\mu\text{m}$ de distance entre la membrane et le substrat), il serait possible que les deux surfaces se touchent et conduisent si la taille de la structure est suffisamment grande. En effet, dans notre dispositif, il n'y a pas d'oxyde qui sépare le substrat du gap d'air.

5.6 Considérations sur la simplicité et la robustesse de la fabrication

Au chapitre 2, on a présenté comme critères de simplicité et de robustesse de fabrication les éléments suivants : 1) l'intégration à un procédé de microélectronique CMOS traditionnel auquel des étapes simples et peu nombreuses de post fabrication sont ajoutées ; 2) les variations de procédé ont un impact faible sur le comportement du dispositif.

Pour ce qui est de l'intégration à un procédé de microélectronique CMOS traditionnel, cette technique est fort adéquate. En effet, les ouvertures à la gravure sacrificielle et à la gravure anisotrope peuvent se faire dans le respect des règles de design formulées par les fonderies commerciales. En comparaison, la gravure anisotrope par le dos, puisqu'elle n'usine pas la face avant, est compatible avec les procédés CMOS par nature. Par contre, si la gravure anisotrope est faite par la face avant, les ouvertures qui dénudent le silicium sont des entorses aux règles de design ("*Process design rules*")

Si l'intégration CMOS se fait sans embûche pour la gravure anisotrope par le dos, la nécessité de l'alignement par le dos constitue une tâche ardue et longue et qui peut endommager la face avant. La technique proposée ici offre la même simplicité pour la gravure de la cavité : il s'agit de plonger les gaufres dans les solutions appropriées. Pour toutes ces techniques, il faut aussi considérer que même les couches aux taux de gravure les plus faibles sont gravées

éventuellement et que si la durée de gravure est trop grande sans qu'aucune précaution ne soit prise, il y a risque d'affaiblir la tenue mécanique du dispositif.

La difficulté pour les techniques sans lithographie réside dans la protection de la circuiterie électronique et surtout des plots métalliques de connections pendant l'usinage du capteur. Pour la gravure par la face avant, l'utilisation d'une solution qui ne grave pas l'aluminium ou la modification d'une solution en ce sens peut être fait. Il est aussi possible de faire une passivation électrochimique des régions métalliques à protéger. Pour la technique proposée ici, il s'agit de graver une couche de même nature, l'aluminium, en certains endroits et pas en d'autres endroits. Plusieurs options peuvent être proposées. La passivation électrochimique peut être l'une d'elle [25]. L'emploi d'un support grillagé qui protège le contour des dés mais non le contre du dé où se trouve le capteur est une autre solution. Une solution plus efficace mais plus complexe consiste en le dépôt et la mise en forme grossière d'une couche de photorésine pour la durée de la gravure sacrificielle de la couche d'aluminium. Une solution plus simple consiste à profiter des balles d'or ("gold bumps") déposés sur les plots métalliques et utilisés normalement pour connecter deux circuits l'un à l'autre dans le cas de la mise en boîtier dite "flip-chip" [67].

Enfin, la robustesse du design et du procédé vient de sa simplicité, d'abord, mais aussi du contrôle de la profondeur de la gravure. Il est souvent possible de graver une cavité d'une profondeur telle que la variation de la hauteur de la membrane entre capteurs et en cours d'opération est faible en rapport avec la distance membrane à substrat. Si la cavité nécessaire est trop profonde, il faut considérer le dépôt de couches de compensation de contraintes ou

l'utilisation du procédé d'un manufacturier dont les couches présentent des contraintes résiduelles moins importantes.

Dans un tout autre ordre d'idée, un autre élément relatif à la robustesse du design peut être soulevé. La structure à cavité enfouie, comme la plupart des structures MEMS, a pour effet d'exposer à l'air des matériaux autres que l'oxyde de passivation. Dans le cas de la structure à cavité enfouie, il s'agit surtout de l'exposition à l'air des oxydes intermétalliques. Or, souvent, la couche de passivation est faite d'un matériau et selon des propriétés telles qu'elle constitue une barrière à la diffusion de l'humidité et d'espèces corrosives qui changent les propriétés mécaniques et électriques des matériaux. Il n'en est pas ainsi des oxydes intermétalliques exposés après la libération de la membrane. Si on destine la structure à un capteur opéré dans l'air, comme un capteur de pression ou un capteur de gaz, il faudra considérer l'impact de l'exposition à l'air des oxydes intermétalliques sur la tenue du capteur.

5.7 Résultats de fabrication

Des structures semblables aux trois variantes présentées à la figure 4.2 ont été fabriquées. À la figure 5.1, on retrouve une structure à ouvertures minimales, totalement fabriquée au laboratoire LISA. Dans ce cas, la seconde couche de métal est le platine. Les figures 5.2 et 5.3 montrent des exemples de structure en croix et de structure à bras allongés complexes fabriqués par post fabrication après fabrication commerciale (procédé Mitel 1.5µm DPDM (double polysilicium, double métal) par l'entremise de la Société canadienne de microélectronique SMC/CMC).

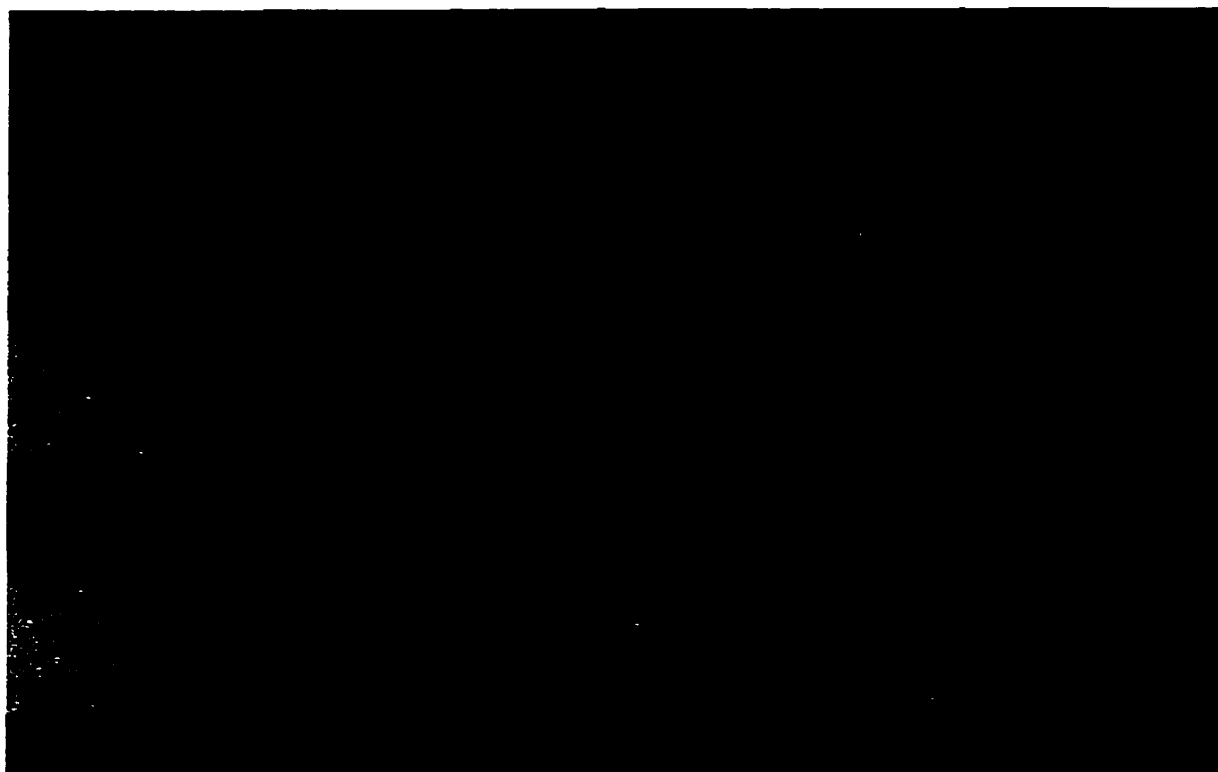


Figure 5.1 Micrographie MEB d'une structure à ouverture minimale obtenue par fabrication au laboratoire LISA. Les couches utilisées ont été un substrat de silicium recouvert de nitrure de silicium, une couche d'aluminium évaporée, une couche de nitrure de silicium obtenue par plasma ECR et une couche de platine.

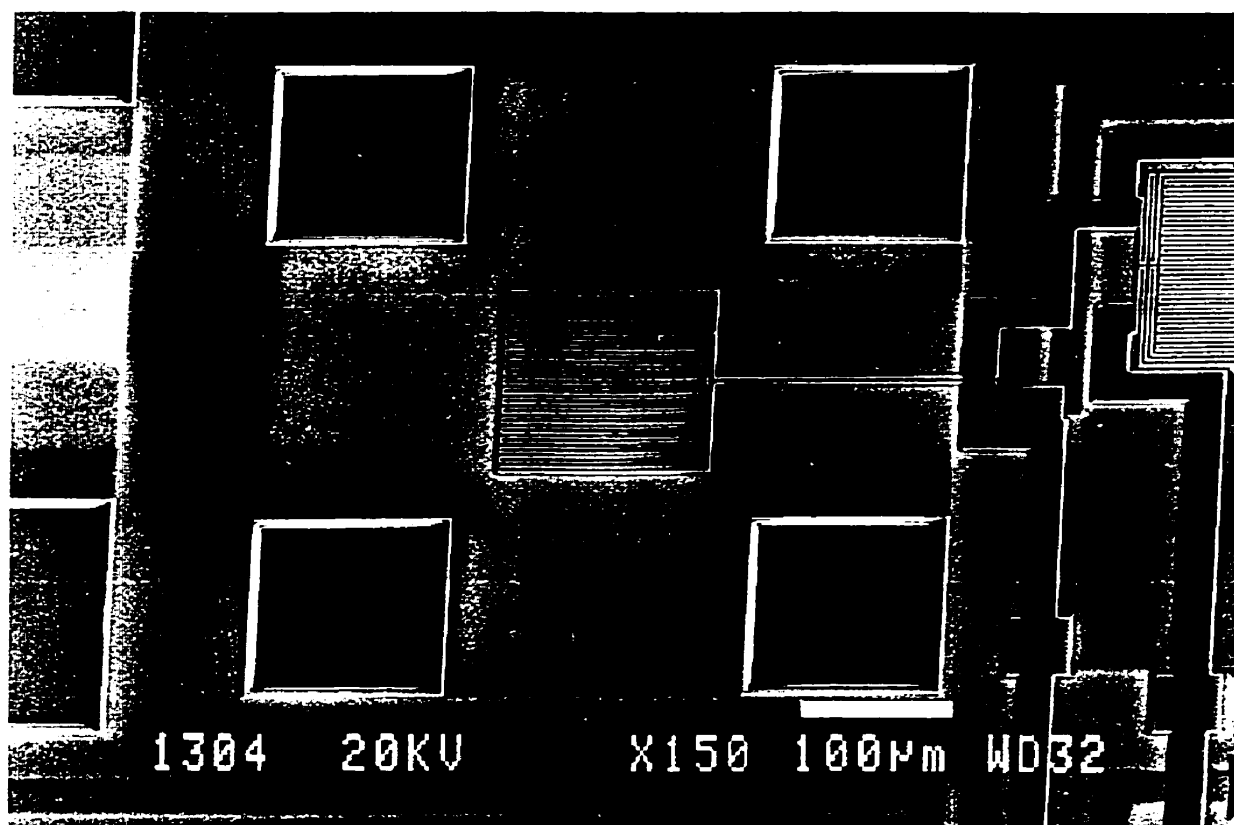


Figure 5.2 Micrographie SEM d'une structure en croix obtenue par fabrication commerciale (Mitel 1.5µm) et post fabrication au laboratoire LISA.

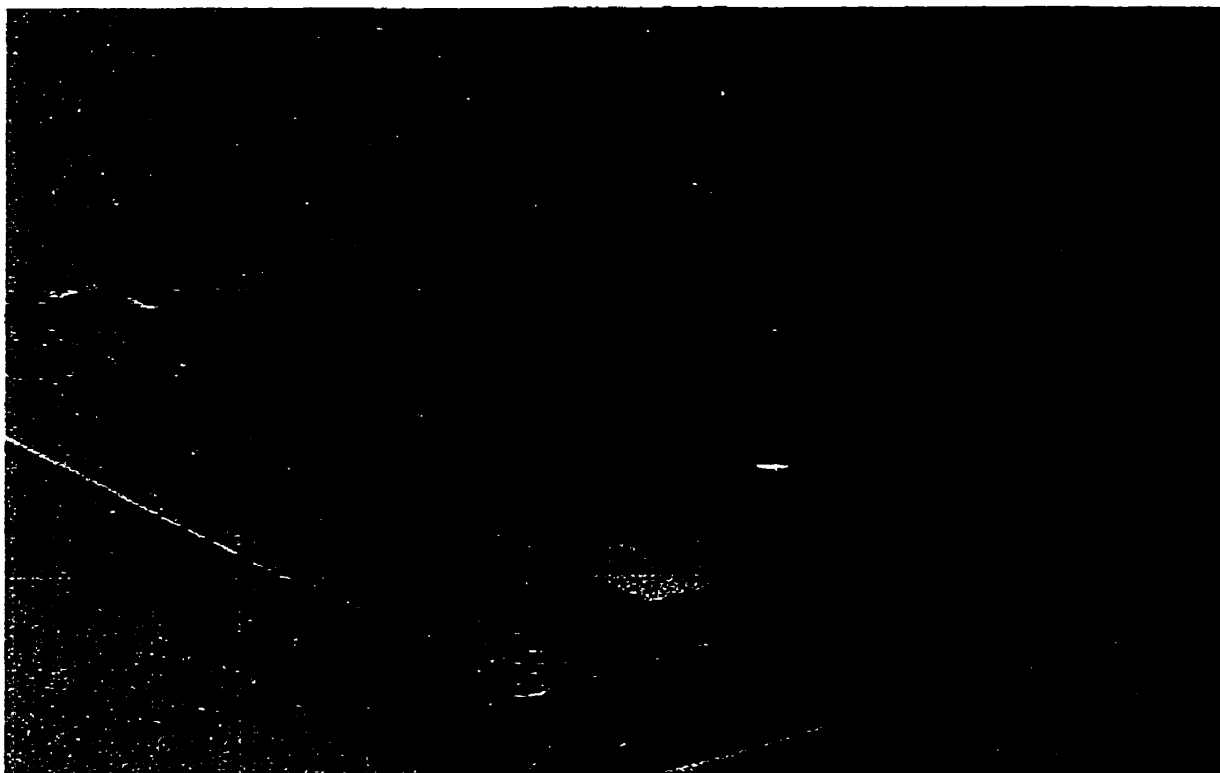


Figure 5.3 Micrographie SEM d'une structure à bras allongés complexes obtenue par fabrication commerciale (Mitel 1.5 μ m) et post fabrication au laboratoire LISA.

Les deux micrographies de la figure 5.4 montrent un détail dans un autre exemple de structure à bras complexes. On voit bien que les bras sont libérés.

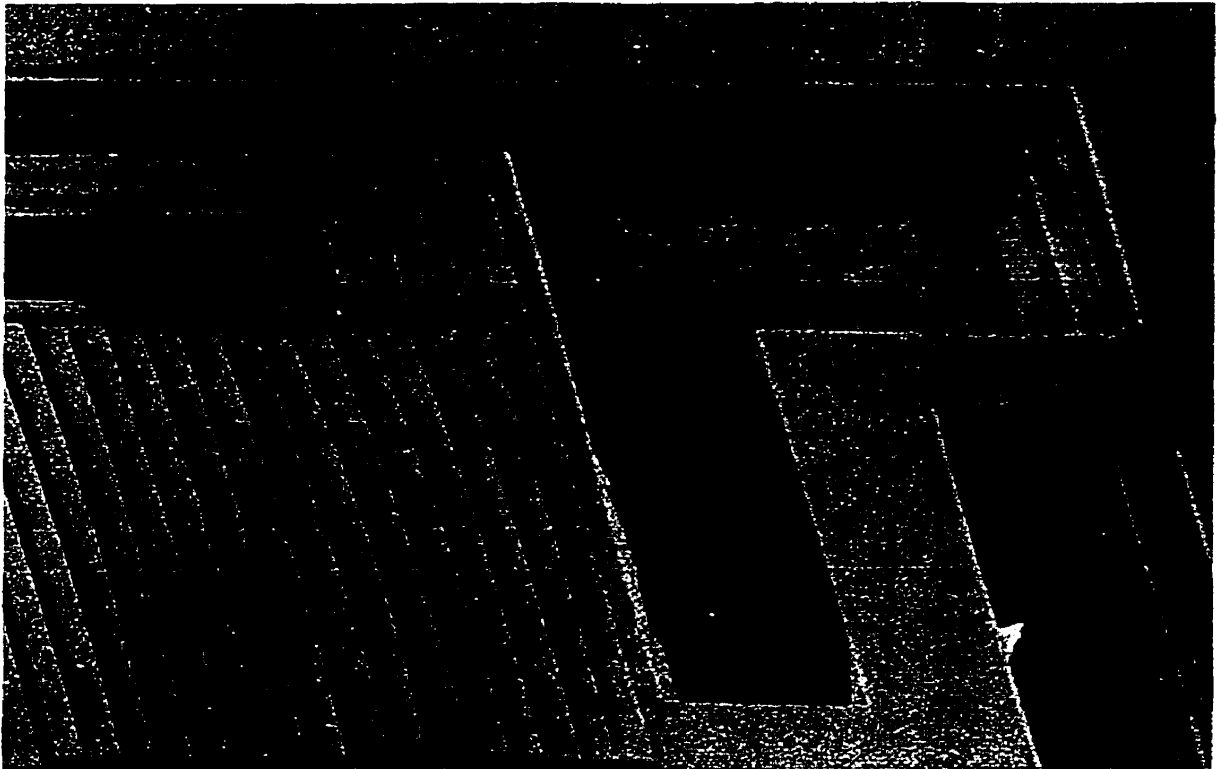


Figure 5.4 a) Micrographie SEM montrant sous les bras d'une structure à bras allongés complexes obtenue par fabrication commerciale (Mitel 1.5 μ m) et post fabrication au laboratoire LISA (détail).

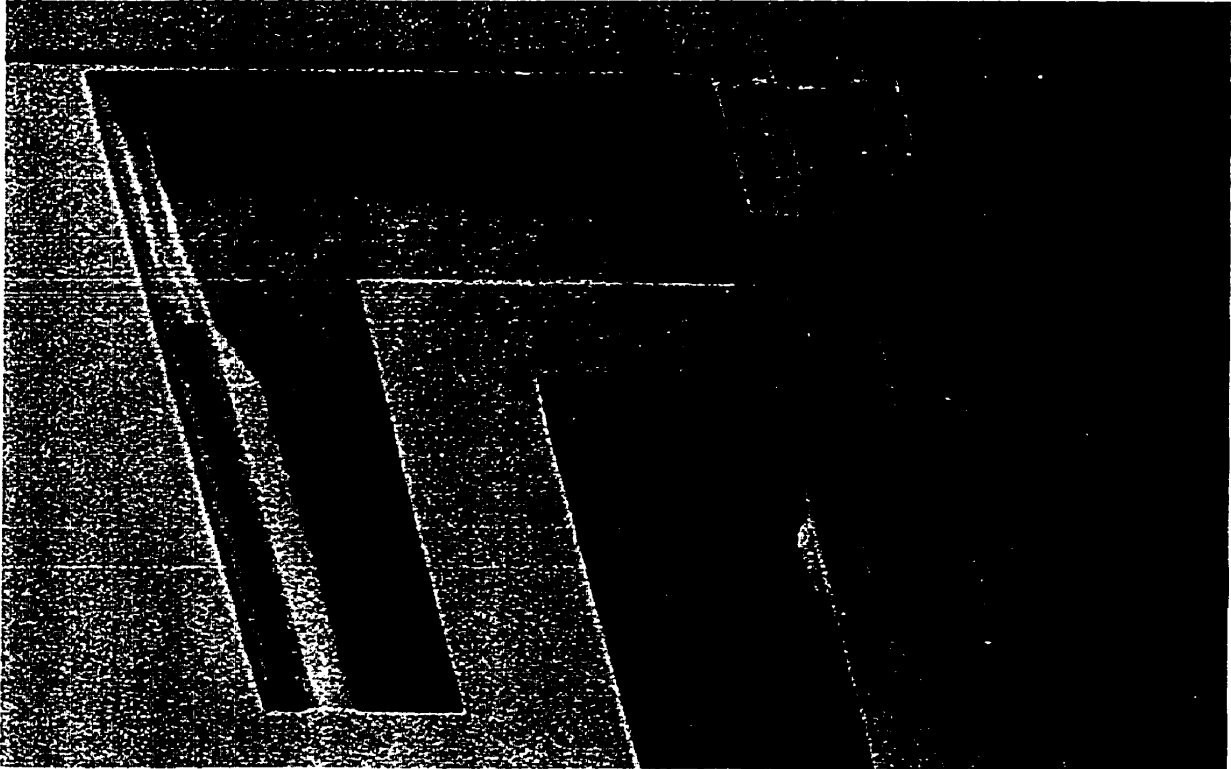


Figure 5.4 b) Micrographies SEM montrant sous les bras d'une structure à bras allongés complexes obtenue par fabrication commerciale (Mitel 1.5 μ m) et post fabrication au laboratoire LISA (détail).

La figure 5.4 montre que les bras complexes ne sont pas horizontaux à la fin de la gravure. En effet, ils se courbent sous l'effet des contraintes résiduelles. Ces figures sont aussi des exemples pour lesquels la gravure s'est effectuée trop longtemps. Les couches isolantes par-dessus le métal ont été trop gravées et n'assurent plus la tenue mécanique du dispositif.

Chapitre VI

Discussion

Au chapitre précédent, on a décrit les avantages, désavantages, contraintes et limites de la structure proposée, la structure à cavité enfouie, et de sa technique de fabrication. Les conclusions les plus importantes sont reprises ici.

- 1) Le capteur peut être intégré sur le même dé qu'un circuit électronique CMOS tout en respectant les règles de design des fonderies commerciales. Le design est donc dit compatible CMOS.
- 2) La profondeur minimale de la cavité est libre ; elle est indépendante de la géométrie de la structure. Elle peut être aussi petite qu'un micron. La profondeur maximale est donnée par la profondeur de la pyramide inversée formée à partir de la surface et elle peut être aussi profonde que quelques centaines de microns.
- 3) Les étapes de post fabrication ne nécessitent pas d'alignement fin et de dépôt de couche, si ce n'est la protection des plots de connexions métalliques.
- 4) Les étapes de post fabrication sont simples. Le plongeon dans des solutions de gravure suffit, à la protection des plots de connexions métalliques près.
- 5) La gravure de la membrane ne s'accompagne pas d'une concentration de contraintes sous la structure qui viendraient endommager la structure et diminuer le rendement de fabrication.

- 6) La possibilité de choisir la profondeur de la cavité permet de choisir une profondeur idéale pour minimiser les déformations thermiques, mécaniques, électromécaniques et thermomécaniques qui surviennent après la formation de la structure ou en cours d'opération.
- 7) Les trous qui sont visibles en surface ne sont pas profonds, quelques microns tout au plus. Il est donc possible de déposer et de mettre en forme des couches sensibles après la libération de la membrane.
- 8) L'isolation thermique de la membrane peut être amenée à un niveau élevé sous vide. Il faut éloigner autant que possible les bras et la membrane du substrat si l'on désire une bonne isolation thermique dans l'air.
- 9) Le chauffage de la membrane est limité par l'emploi de l'aluminium comme élément chauffant. L'aluminium est sujet à l'électromigration et a une résistance électrique faible, ce qui limite la puissance de chauffage. Sa conduction thermique est élevée, ce qui a pour effet de limiter la température atteinte par l'élément chauffant. Enfin, la température de fusion de l'aluminium est peu élevée, ce qui limite son emploi à haute température peu importe les autres considérations thermoélectriques.
- 10) L'intégration à un procédé CMOS a pour conséquence que le concepteur est dépendant des propriétés mécaniques des couches de son capteur. Aussi, les propriétés sont souvent inconnues et une fonderie commerciale peut décider de modifier son procédé et les couches de son procédé afin d'obtenir une meilleure qualité ou un rendement amélioré, à l'insu du concepteur.

Dans ce chapitre, les caractéristiques du design et du procédé sont discutés au regard des applications auxquelles le design peut vraisemblablement être destiné. Dans un premier temps, les quatre capteurs thermiques présentés au chapitre 2 sont examinés. Par la suite, une discussion est brièvement ouverte sur l'emploi de la technique à d'autres applications.

6.1 Utilisation pour les capteurs désirés

6.1.1 Capteur de pression

Une des premières applications types pour ce nouveau design est le capteur de pression de type Pirani. En effet, il est possible d'amener la conduction thermique dans les bras à un niveau faible et d'offrir une distance membrane à substrat d'un micron ou de quelques microns.

En ce qui concerne la pression mesurable la plus basse, elle est la pression pour laquelle la conduction thermique dans les bras égale la conduction thermique dans l'air : sous cette pression, la conduction dans les bras domine sur la conduction dans l'air et donc la mesure de la pression par mesure de la conductivité de l'air devient moins précise.. En utilisant la relation 2.3, on obtient une pression basse de l'ordre de ($P \ll P_0$) :

$$G_{AIR}|_{MIN} = G_0 P_{MIN} A_{MEMBRANE} = G_{BRAS}$$

$$\begin{aligned}
P_{MIN} &= \frac{G_{BRAS}}{G_0 \cdot A} = \frac{G_{BRAS}}{G_0 P_0 \cdot A} P_0 \\
P_{MIN} &= G_{BRAS} \frac{d_{GAP}}{k_{AIR} A} P_0 \\
P_{MIN} &= G_{BRAS} \frac{d_{GAP}}{k_{AIR} A} \frac{9\gamma - 5}{\gamma + 1} \frac{\lambda_{VPA}}{\alpha \cdot d_{GAP}} \cdot 1Pa \\
P_{MIN} &= \frac{G_{BRAS}}{A} \frac{9\gamma - 5}{\gamma + 1} \frac{\lambda_{VPA}}{\alpha \cdot k_{AIR}} \cdot 1Pa
\end{aligned} \tag{6.1}$$

La pression minimale est donc totalement déterminée par l'isolation thermique sous vide dans les bras et la surface de la membrane. Elle est totalement indépendante de la distance entre les membranes. Cette relation fort importante est probablement connue des concepteurs de capteurs Pirani, mais l'auteur ne l'a jamais rencontrée auparavant.

La pression la plus basse mesurable sera obtenue avec la membrane la plus grande et la meilleure isolation thermique de la membrane. En utilisant une conductance thermique sous vide de $11.5\mu W/K$ et une membrane de $200\mu m$ de côté on obtient une pression basse de 3matm ou environ 2 torr . Certains auteurs [48, 63] mesurent tout de même au-delà de la pression critique, en mesurant la différence de conductance thermique entre le vide complet (pression bien inférieure à P_{MIN}) et la conductance lue. Cette technique permet de mesurer une conductance 10 fois plus faible que la pression critique pour laquelle la conductance dans l'air atteint celle dans les bras, mais un algorithme de mesure doit venir compenser la perte de linéarité de la relation entre la conductance thermique et la pression. Ces groupes mesurent donc des pressions basses allant jusqu'à 1 matm [63] ou même $0,1\text{ matm}$ [48].

En ce qui concerne la pression mesurable la plus haute, la pression de transition, la distance entre la membrane et le substrat le détermine. En effet, la pression de transition est inversement proportionnelle à cette distance. Par exemple, à température de la pièce, la pression de transition de l'air tourne autour de 0.2atm pour une distance de $1\mu\text{m}$ et de 0.04atm pour une distance de $5\mu\text{m}$. Cependant, si la relation n'est plus linéaire à partir de ce point, une lecture est toujours possible, pour un ou deux ordres de grandeur. Par exemple, le groupe de ETH Zurich [63] a pu mesurer jusqu'à une pression de 6atm avec une distance de $1\mu\text{m}$. Une circuiterie électronique semblable avec une distance de $5\mu\text{m}$ pour se protéger contre les déformations mécaniques devrait donc permettre tout de même une mesure jusqu'à 1atm, ce qui probablement tolérable pour un capteur de vide.

Dans le domaine des capteurs de pression intégrés, le monde se divise en trois. D'une part, certains utilisent l'épaisseur d'une couche d'un procédé commercial, comme le groupe de l'ETH à Zurich [63], et d'autres développent des couches et des procédés avec une meilleure tenue mécanique et un espacement plus fin ($0.3\mu\text{m}$) comme celui de Shie à Taiwan [48] et élargissent alors la gamme de pressions mesurées, surtout dans le domaine des hautes pressions. Dans les deux cas, les déformations de la membrane d'un capteur à l'autre ou en cours d'opération doivent être considérées attentivement afin d'assurer un rendement de fabrication et une robustesse de design suffisants. Les derniers préfèrent utiliser la gravure anisotrope de face traditionnelle et ses cavités profondes, comme le groupe de Stanford [60]. La tenue mécanique est améliorée au détriment d'une gamme de pression plus restreinte à haute pression, mais qui est comparable sinon meilleure à basse pression. Le capteur thermique à cavité enfouie constitue un compromis entre gamme de pression et comportement mécanique. En bref, la

technique et le design présentés ici peuvent rivaliser avec les meilleurs designs à basse pression, mais son comportement est moins éclatant à plus haute pression.

6.1.2 Capteur de gaz à base de couche sensible

La conception de capteurs de gaz doit satisfaire deux besoins principaux : le chauffage de la membrane du capteur opéré dans l'air et le dépôt de couches minces sensibles aux produits chimiques par nature.

Le second point est avantageusement offert par la technique présentée ici. Les cavités visibles en surface sont peu profondes et ne gênent pas le dépôt et la mise en forme des couches minces traditionnels. Les accidents topologiques ont une taille inférieure à 2 ou 3 microns. Pleine liberté est offerte au concepteur du procédé pour le choix de la technique de dépôt et de mise en forme qui réduit le moins les performances de la couche sensible.

Le premier point n'est pas totalement satisfait. L'utilisation de l'aluminium comme élément chauffant et la proximité de la membrane et du substrat réduisent les températures possibles, et entraîne une consommation de puissance relativement élevée, si l'on compare à l'utilisation du polysilicium comme élément chauffant, dans un procédé à gravure anisotrope traditionnel. On a même vu qu'il fallait développer des techniques pour contourner le problème de l'électromigration afin de pouvoir utiliser le capteur à 100K au-dessus de la température ambiante. Pour ces capteurs opérés à faible température, comme les capteurs de CO à base d'oxyde d'étain comme ceux qui ont été développés au laboratoire LISA [5], cette technique est appropriée si les mesures de précaution sont prises.

Enfin, la possibilité d'intégrer les capteurs de gaz sur le même dé que la circuiterie électronique offre d'importants avantages. Des mesures précises in situ peuvent être prises, plusieurs capteurs peuvent être mis en parallèle et on peut faire des calculs très complexes et agir sur le capteur (remise à zéro, changement dans l'excitation ou la lecture du signal) sans communiquer avec l'extérieur.

En résumé, l'intégration de l'électronique et des cavités invisibles en surface rendent la technique fort attrayante. Par contre, les limitations en température dans un procédé commercial (dues à l'emploi de l'aluminium) réduisent le champ d'application possible.

6.1.3 Capteur de tension moyenne d'un signal variable

Le convertisseur de signal variable à moyen (convertisseur ac-dc(rms)) peut être opéré sous vide ou dans l'air à pression atmosphérique. Dans les deux cas, la considération thermique de design la plus importante est la sensibilité du capteur. On néglige ici les autres considérations du domaine électrique (bande passante, etc.). La sensibilité du capteur provient de la température atteinte pour un signal donné et de la variation d'un signal en fonction de cette température.

L'isolation thermique et la résistance de chauffage déterminent la température atteinte par un signal donné en donnant la conductance thermique et la puissance. Puisque l'on mesure une tension, une faible résistance de chauffage permet d'obtenir une plus grande puissance dissipée, selon $P = V^2/R$. Quant à l'isolation thermique, elle est comparable aux capteurs obtenus par gravure anisotrope par la face avant sous vide, mais est souvent bien moins bonne dans l'air.

Pour ce qui est de la variation d'un signal en fonction de la température, il s'agit du changement de la résistivité d'une résistance témoin, dans un capteur thermorésistif comme ceux présentés ici. Le coefficient de température de la résistivité (TCR), avec la valeur de la résistance et le courant qu'on fait passer dans la résistance témoin (très petit pour éviter que l'effet Joule ne vienne embrouiller la mesure) détermine la variation de tension par degré de chauffage. Dans l'industrie, l'aluminium est rarement utilisé dans les capteurs thermorésistifs, bien que son TCR soit élevé (4290 ppm/K [76]). On lui préfère le platine, dont la résistivité est plus grande et le TCR semblable (3927ppm/K [76]) est linéaire sur une grande plage de température et affiche une température de fusion élevée. La résistivité et le TCR élevés du polysilicium –un TCR allant jusqu'à 1500ppm/K – en font un autre candidat intéressant. Les autres techniques utilisées sont la mesure par effet thermoélectrique (effet Seebeck, thermocouples) et par l'utilisation de diodes en inverse, dont la tension diminue d'environ 2mV/K.

La technique de fabrication la plus répandue à ce jour pour les convertisseurs ac-dc est la gravure anisotrope de face, pour sa simplicité et la grande isolation thermique. La mesure est souvent prise en utilisant des thermocouples [17, 77] ou des diodes en inverse [15].

Pour ce capteur, notre design offre une technique simple. Cependant, le dispositif produit est moins sensible étant donné la faible résistivité de l'aluminium.

6.1.4 Capteur infrarouge

Les capteurs infrarouges peuvent être utilisés sous air ou sous vide. Ils nécessitent le dépôt et la mise en forme d'une couche sensible sur la membrane pour absorber les radiations. Ils ont donc

les besoins du capteur de gaz et du convertisseur de signal variable à continu moyen, sans le chauffage du capteur de gaz.

Si le capteur est opéré sous vide, l'isolation thermique élevée ainsi que la simplicité du dépôt des couches sensibles rendent cette technique fort utile. Par contre, sous air, l'isolation thermique est plus difficile à obtenir.

La nécessité de déposer une couche sensible explique la popularité de la gravure anisotrope par le dos pour ce capteur [18]. La gravure par la face avant a aussi été employée.

6.2 *Autres applications*

6.2.1 *Actuateurs thermiques : bilames*

Les actuateurs thermiques sont des dispositifs qui changent de forme pour agir sur l'environnement. Les actuateurs thermiques utilisent les contraintes thermomécaniques obtenues par chauffage thermoélectrique pour ce faire. Parmi ces dispositifs, on compte les valves [74], les matrices de cils pour déplacer des objets de taille microscopique [78,79], les relais thermiques [80] ainsi que les dispositifs bistables [81]. La figure 6.1 présente certaines de ces applications thermiques.

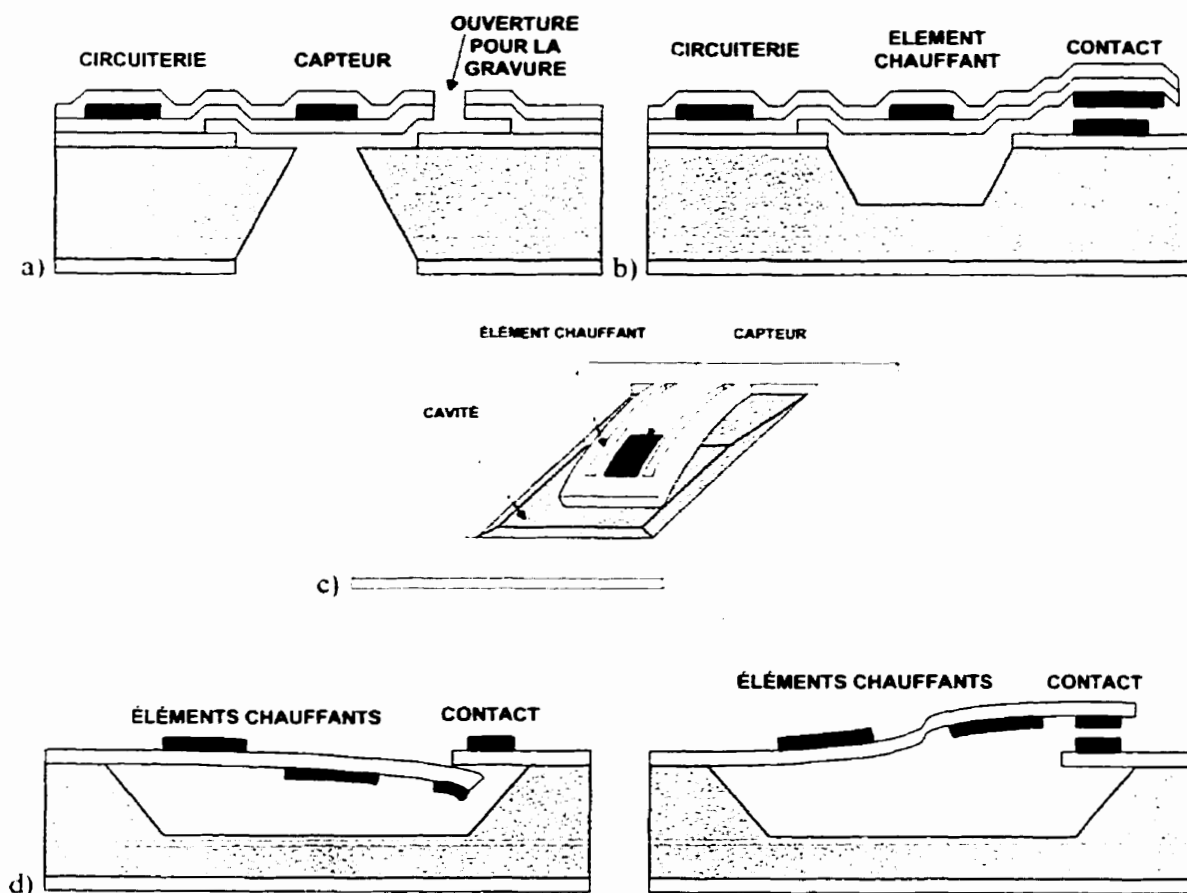


Figure 6.1 Applications des actuateurs thermiques. a) valve b) relais thermique c) micro-miroirs d) dispositif bistable.

Pour toutes ces applications, on recherche à obtenir une différence de coefficient d'expansion thermique la plus grande possible. Le couple aluminium – oxyde de silicium est un bon choix, avec près de 20 à 25 ppm/°C de différence. En comparaison, le couple polysilicium –oxyde de silicium offre moins de 5 ppm/°C. En échange, la température atteinte peut être plus élevée avec ce couple.

La technique proposée ici permet de fabriquer ces dispositifs, souvent de façon avantageuse. En effet, l'utilisation de la gravure anisotrope par la face avant pour la formation d'un bilame polysilicium et oxyde est propice au bris de la structure en cours de gravure [57]. Il est possible d'éviter les bris ou à tout le moins réduire la fréquence des défauts, mais cela impose de sérieuses contraintes sur la géométrie du design [57].

En ce qui concerne les valves thermiques, cette technique permet de les fabriquer sans alignement double face au dos de la gaufre. La technique offre donc une plus grande simplicité et évite d'abîmer les circuits électroniques de la face avant.

Pour ce qui est de la matrice de cils, il faut s'assurer que le trilame (l'aluminium chauffé est mis entre deux couches de diélectrique) peut avoir un déplacement vers le haut. En effet, si on décape le haut de la membrane pour en faire un bilame, l'aluminium se retrouvera en haut et la déformation se fera vers le bas.

Le micro-miroir a habituellement sa déformation vers le bas : le problème ne se pose donc pas. De plus, la déformation atteint habituellement quelques dizaines ou centaines de nanomètres [47]. La structure à cavité enfouie peut donc être utilisée avec une cavité très peu profonde et donc en utilisant une gravure anisotrope d'une durée courte, ce qui limite le risque que la gravure perce les couches de diélectriques.

En conclusion, la structure à cavité enfouie est une solution potentielle à de nombreux actuateurs thermiques. Toutefois, les limites dans le chauffage dues à l'électromigration doivent être considérées dans l'étude de fiabilité de ce dispositif. Il peut être nécessaire de remplacer l'aluminium par un autre conducteur, avec les complications que cela implique.

6.2.2 Autres capteurs thermiques

Parmi les nombreuses autres structures isolées thermiquement pour lesquelles on pourrait montrer l'utilité ou non de l'emploi de la structure à cavité enfouie, le capteur de contraintes de cisaillement d'un écoulement et le capteur de gaz par mesure de la conductivité thermique ont été retenus.

6.2.2.1 Le capteur de contraintes de cisaillement dans les écoulements

Le capteur de contraintes de cisaillement dans les écoulements est en fait un capteur de débit micro-usiné. Étant de petite taille, le capteur peut être disposé à plusieurs endroits sur une surface afin de mesurer la vitesse de l'écoulement sur la surface. Cette mesure est alors utilisée pour étudier les phénomènes aérodynamiques sur les surfaces, tant spatialement que temporellement [28].

Un tel capteur de contraintes peut être obtenu de la façon suivante : on définit deux résistances sur une membrane suspendue. La première résistance est chauffée et l'autre, à une certaine distance de celle-ci, est chauffée par le transport de chaleur dans le gaz. Afin que le transport de chaleur s'effectue principalement dans l'écoulement, il est utile de d'abord isoler thermiquement la membrane et aussi, de mettre sous vide la cavité sous la membrane [28].

La structure à cavité enfouie est un bon candidat pour le capteur de contraintes de cisaillement dans les écoulements. En effet, on peut graver une cavité profonde sous la membrane. On peut aussi isoler thermiquement la membrane en la dessinant suffisamment grande. Enfin, puisque

les trous nécessaires à la gravure sont peu profonds, il est possible de déposer localement quelques microns d'un matériau, sous vide, ce qui scellera la cavité (sous vide, toujours).

6.2.2.2 Le capteur de gaz par mesure de la conductivité thermique

Le capteur de gaz à base de couche sensible décrit tout au cours de ce mémoire n'est pas un capteur thermique en soi, mais plutôt un capteur qui a besoin d'être porté à une température élevée pour opérer de façon optimale. Il existe un autre type de capteur de gaz qui est un capteur thermique : c'est le capteur de gaz par mesure de la conductivité thermique [22, 82].

Le principe du capteur de gaz par mesure de la conductivité thermique a pour principe le suivant. La conductivité thermique des gaz varie selon le gaz. Dans un mélange de deux gaz à pression constante, la conductivité thermique du mélange prendra une valeur comprise entre les conductivités des deux gaz du mélange, selon le rapport de concentration de chacun.

Pour un tel capteur, le facteur le plus important est la sensibilité. On désire que la conduction thermique dans l'air soit la plus importante possible, en comparaison avec toute autre conduction (dans les bras, par exemple). Par contre, il ne faut pas que la membrane soit trop près du substrat et que le régime de conduction dans le gaz devienne moléculaire : les conductances thermiques des gaz diffèrent plus à pression élevée qu'à pression faible [83].

Le capteur thermique à cavité enfouie est un très bon candidat pour un tel capteur. La membrane peut être placée près du substrat, tout en faisant de long bras, de sorte que la conduction dans les bras peut être rendue négligeable face à la conduction dans le gaz.

Chapitre VII

Perspectives

Dans ce mémoire, un nouveau design, la structure à cavité enfouie, et son procédé de fabrication associé ont été présentés. De plus, un ensemble d'outils d'analyses du premier ordre a été développé afin de faire son analyse. Quelques essais de fabrication avec un procédé dédié et en intégration avec de l'électronique sur un procédé CMOS commercial ont été menés. Néanmoins, aucune de ces avenues n'a été poussée à sa limite. Il y a encore beaucoup de place pour des analyses, de la recherche et du développement autour du concept et du procédé de fabrication et des applications possibles. Ce chapitre présente quelques-unes de ces avenues.

7.1 Modélisation des capteurs

Les techniques de modélisation utilisées ici sont simples. Cette simplicité a été préférée à une analyse technique complexe et plus «complète» en conséquence de deux faits énoncés précédemment : les outils d'analyse plus précis ne sont pas disponibles ou totalement appropriés; même en utilisant des outils dédiés aux structures micro-usinés, les connaissances sur les propriétés physiques des couches sont limitées et varient d'un procédé, d'un lot ou même d'un dispositif à un autre, ce qui limite la validité des résultats et nécessite une multitude d'analyses afin de tenir compte de toutes les variations possibles dans les propriétés des couches.

Cet état de choses n'est pas étonnant. Les capteurs micro-usinés CMOS sont en fait au même point que les circuits à transistors l'étaient au tout début de l'électronique intégrée. À ce

moment, les modèles des transistors étaient simples, les variations de procédés étaient grandes et les concepteurs de circuits électroniques cherchaient à concevoir les circuits les plus performants mais aussi les plus robustes à l'intérieur de la méconnaissance de leur matériau.

Depuis, le monde de l'électronique intégré a obtenu une certaine maturité. Les fonderies possèdent un meilleur contrôle de leur procédé et ils publient les variations statistiques des différents paramètres. Les concepteurs et les fonderies se sont entendus sur un outil de simulation – SPICE - et développent des modèles de transistors de plus en plus complexes et précis afin de permettre de concevoir des designs de plus en plus performants et de plus en plus robustes.

Pour les capteurs micro-usinés, la première étape du mûrissement est encore à faire. Pour un groupe de recherche en capteurs micro-usinés CMOS qui pense utiliser un procédé en particulier, il y a un intérêt certain à mesurer les propriétés physiques des couches d'un procédé CMOS, de lot en lot. D'un autre côté, les fonderies qui verront un intérêt économique au marché des capteurs micro-usinés CMOS mesureront et publieront elles-mêmes ces résultats. Dans les deux cas, il serait très approprié de retrouver sur chacune des gaufres fabriquées une structure de test mécanique analogue à la structure test électronique dont se servent les fonderies pour le contrôle de qualité de leur procédé de fabrication. Ces tests devraient être simples, rapides, mais précis et mesureraient une grande gamme de paramètres physiques. Un travail de recherche en ce sens s'avérerait fort utile à la préparation de la fabrication à haut volume de capteurs intégrés.

En parallèle, le développement futur des outils d'analyse simples présentés ici conserve tout son intérêt. Dans toute conception, il est utile de débiter son étude avec les modèles les plus simples, disent les concepteurs les plus aguerris du domaine des circuits analogiques [84].

7.2 Fabrication de capteurs à cavité enfouie

Ce mémoire a présenté un nouveau design de capteurs thermiques, le capteur à cavité enfouie. Les analyses ont montré que le design était prometteur pour un certain nombre de capteurs et actuateurs thermiques. Une suite logique à ce mémoire serait de concevoir, de fabriquer et de caractériser les performances des plus prometteurs de ces capteurs.

7.3 Intégration dans un circuit

Après avoir franchi l'étape de la fabrication d'un capteur, une étape qui n'a rien de trivial si on garde en tête toutes les contraintes de design dont il a été question au chapitre 2, il s'agit d'intégrer le design sur le même dé qu'un circuit électronique qui excite et lit le signal du capteur. En effet, l'intégration à l'électronique sur le même dé est l'un des deux avantages les plus importants de l'utilisation des procédés CMOS pour la fabrication. L'autre avantage consiste en la possibilité de fabriquer les capteurs avec une technologie établie et à faible coût.

Dans la mesure du possible, l'étape de conception permettra à simuler la partie électronique et la partie mécanique simultanément. On a vu au chapitre 2 qu'il était possible de simuler les comportements thermiques et électriques d'un capteur en utilisant le logiciel utilisé pour les

simulations électroniques, Spice. Il est donc possible de grouper dans une même simulation les réseaux mécanique et électrique et de simuler les deux.

Une autre approche proposée récemment est l'emploi d'un langage de haut niveau. Dans le monde de l'électronique, tout un pan de l'industrie n'a pas à s'intéresser aux transistors, aux dopages, aux matériaux, etc., ce sont les concepteurs de circuits digitaux. Ces ingénieurs conçoivent des circuits électroniques non pas au niveau des transistors, ni même au niveau de cellules logiques et de leurs délais, ils font leur circuit en programmant dans un langage de haut niveau, tels VHDL et Verilog. Des outils informatiques font ensuite pour eux la conversion du VHDL (Verilog) vers des cellules et des transistors.

Plus récemment, des efforts ont été faits pour développer des outils semblables pour les concepteurs de circuits analogiques. On comprendra aisément qu'il est plus difficile de caractériser les paramètres utiles du comportement d'un inverseur que ceux d'un amplificateur. C'est pourquoi l'industrie prend beaucoup de temps à accepter ce nouvel outil. Par contre, avec les circuits qui deviennent de plus en plus gros, la conception analogique de haut niveau répond à un besoin qui s'annonce pressant sous peu.

En ce qui concerne les capteurs, certains groupes de recherche explorent déjà le filon. En effet, plusieurs groupes de recherche [85, 86] travaillent à l'élaboration d'un logiciel qui simule un dispositif mécanique en couches minces par la méthode des éléments finis, en faisant varier un certain nombre de paramètres et de conditions. Les résultats des analyses sont ensuite traduits dans le langage de conception analogique de haut niveau. Pour le concepteur du capteur, il s'agit dès lors de choisir un circuit analogique d'excitation, de lecture et de traitement de signal

approprié pour un capteur, tout en choisissant le capteur le plus adéquat et en le simulant au moyen d'un seul et même outil. Si cette technique réussit à s'implanter, ce sera le début de la conception de capteurs de haut niveau : les projets de capteurs se déplaceront de projets de recherche et développement qu'ils sont aujourd'hui vers des projets de conception, réalisant ainsi le souhait du Pr. Senturia cité au chapitre 1 [9, 26].

Un projet de recherche intéressant qui marie la physique, l'électronique et l'informatique serait de développer un logiciel de simulation des capteurs thermiques à cavité enfouie selon différents paramètres (la forme et la longueur des bras, la profondeur de la cavité, la surface de la membrane, la nature et les épaisseurs des couches, etc.) et de traduction des comportements simulés dans un langage de conception électronique analogique de haut niveau.

7.4 Étude plus poussée du concept et de sa technique de fabrication

Il est pertinent de pousser encore plus loin les limites du concept et de la technique de fabrication proposée ici. Les nouveaux procédés de fabrication proposent des dimensions de lignes de métal toujours plus fines, ce qui permettra d'obtenir des résistances thermiques dans les bras plus faibles, des résistances électriques plus grandes et donc des températures plus élevées pour une même puissance électrique. Le nombre de couches métalliques s'accroît, de deux à maintenant trois, quatre, cinq ou même six couches. Il sera alors possible d'équilibrer ou de déséquilibrer l'empilement des couches en choisissant délibérément une ou plusieurs des couches diélectriques pour se retrouver sur ou sous chacun des conducteurs métalliques. Les nouveaux procédés de fabrication font appel au cuivre, qui n'est pas sujet à l'électromigration comme l'aluminium.

En comprenant de mieux en mieux les avantages, contraintes et limites de cette technique, il sera de plus en plus aisé de développer des capteurs plus robustes, plus sensibles, plus adéquats et de créer de nouvelles structures. Mieux encore, de la même façon que ce design s'inspirait des techniques traditionnelles pour développer une nouvelle technique pour satisfaire les besoins, quelqu'un pourra s'inspirer de cette technique et en développer une nouvelle, encore meilleure.

7.5 Développement d'autres outils d'analyse simples pertinents

Les outils d'analyses thermiques, électriques et thermiques simples présentés au chapitre 2 ne constituent pas une liste exhaustive des effets physiques probables et importants à considérer dans le design d'un capteur thermique. Cet ensemble d'outils gagne à être complété par de nouveaux effets, comme la convection thermique, pour les capteurs qui en font la mesure, et la vibration. En effet, si les modes et fréquences de vibration sont parfois utilisés comme mesure de différents paramètres physiques (pensons aux accéléromètres), elles peuvent aussi constituer une source de problème dans un design à structure libre, comme une membrane suspendue.

7.6 Développement d'outils de caractérisation de la fabrication

Dans l'éventualité d'une production de masse de capteurs à cavité enfouie, la caractérisation de la fabrication deviendra une considération majeure. En effet, le contrôle et la mesure de la profondeur de la cavité d'un dé à l'autre et d'une gaufre à l'autre est nécessaire pour à la fois s'assurer que la gaufre est bien gravée et rejeter les dés défectueux le plus tôt possible après la fabrication. Une voie possible consiste en l'utilisation d'un appareillage optique (laser?) qui profite de la transparence des oxydes de la membrane.

Chapitre VIII

Conclusion

À l'origine de ce mémoire, on retrouve l'intérêt de fabriquer différents capteurs et actionneurs thermiques et le constat que les méthodes traditionnelles de fabrication des MEMS ne satisfont pas tous les besoins de ces dispositifs. Ceci a mené à la recherche d'une nouvelle structure et d'un procédé de microfabrication associé qui puissent mieux satisfaire les besoins spécifiques de ces dispositifs thermiques.

Les efforts de design et de fabrication ont rapidement sorti de l'ombre une lacune importante : en plus des questions thermiques entourant le capteur, différentes considérations d'autres ordres devaient être prises en compte. En effet, puisque les capteurs sont faits de membranes suspendues, formées par la gravure chimique de couches minces, portées à haute température, chauffées à l'aide d'un courant électrique, sur lesquelles on veut parfois déposer d'autres couches minces et enfin, parce que l'on désire obtenir un rendement de fabrication raisonnable, il faut étendre les considérations aux domaines mécanique, électrique et chimique, de même qu'aux domaines couplés : thermomécanique, thermoélectrique et électromécanique. Malheureusement, les outils d'analyse de ces considérations se retrouvent un peu éparpillés dans la littérature ou n'existent tout simplement pas.

De ces réflexions et intérêts sont nés les quatre objectifs de ce mémoire :

- 1) la définition d'un ensemble d'outils d'analyse des dispositifs thermiques en couches minces;

- 2) la proposition d'un nouveau dispositif thermique et un procédé de fabrication associé afin de satisfaire des besoins qui ne sont pas comblés par les techniques actuelles ;
- 3) l'analyse critique du nouveau dispositif ;
- 4) l'étude de l'emploi du nouveau dispositif pour des applications de capteur ou actuateur thermique.

Les capteurs thermiques qui nous intéressent sont le capteur de pression de type Pirani, le capteur de gaz à base de couche sensible, le capteur de tension moyenne rms et le capteur infrarouge. Tous ont en commun le besoin d'une isolation thermique élevée : les deux premiers dans l'air et les deux autres sous vide ou dans l'air. Le capteur de gaz à base de couche sensible et le capteur infrarouge partagent le besoin du dépôt de nouvelles couches par-dessus la membrane suspendue, après la libération de celle-ci. Le capteur de pression Pirani quant à lui nécessite une distance membrane à substrat faible pour élargir la gamme de pression lue.

Un ensemble d'outils d'analyse du premier ordre a été rassemblé. Certaines relations y sont présentées pour la première fois tandis que d'autres ont été tirées de la littérature. Par exemple, les relations thermiques permettent d'évaluer la conductance thermique du dispositif dans différentes conditions et de découvrir quels paramètres de design sont les plus importants pour l'améliorer, tandis que les relations thermorésistives montrent l'importance d'utiliser le serpentín le plus fin pour l'obtention de la température la plus élevée pour une même consommation de puissance. On y a aussi remarqué l'impact important des considérations mécaniques sur le comportement et le rendement de fabrication des dispositifs. Les contraintes résiduelles, tout particulièrement, peuvent facilement réduire à néant les chances de succès de la fabrication d'un capteur, si rien n'est fait pour les contrer.

La structure proposée pour satisfaire les besoins des capteurs thermiques qui nous intéressent est la structure à cavité enfouie. Elle consiste en l'utilisation coup sur coup de la gravure sacrificielle de l'aluminium puis de la gravure anisotrope du silicium. La première gravure, isotrope, permet de définir la membrane et expose le silicium sous la membrane. La seconde gravure anisotrope, permet de graver le silicium sous la membrane à une profondeur désirée. Puisque le silicium est totalement exposé dès le début de la gravure anisotrope, il n'y a pas de profondeur minimale de la gravure : on peut s'arrêter après quelques microns ou continuer jusqu'à l'obtention de la pyramide inversée typique de la gravure anisotrope. De plus, on ne trouve en aucun endroit sur la membrane suspendue une concentration de contraintes qui pourrait briser la structure en cours de fabrication. Aussi, il est possible de faire en sorte que l'ouverture au silicium soit cachée sous la membrane et qu'après la libération de la membrane et la gravure de la cavité, cette dernière soit totalement invisible de la surface. Ceci facilite le dépôt et la mise en forme de couches supplémentaires. Enfin, cette technique de microfabrication peut être utilisée avec un procédé CMOS commercial suivi de quelques étapes de micro-usinage relativement simples.

La structure à cavité enfouie permet d'obtenir une bonne isolation thermique sous vide, mais moyenne à faible sous air. La possibilité d'obtenir une profondeur de cavité de quelques microns, plutôt qu'un seul micron comme les capteurs à base de couche sacrificielle typiques, rend le capteur moins susceptible face aux contraintes résiduelles et variations dans les propriétés mécaniques des couches et ce, sans l'emploi de couches de compensation. En ce qui concerne le chauffage thermoélectrique, il est de faible qualité pour une fabrication compatible CMOS car la résistance chauffante est faite d'aluminium. L'aluminium affiche un coefficient d'expansion thermique élevé fort utile - ou nuisible, selon qu'on l'utilise ou non - pour les déformations thermomécaniques, mais présente en échange un problème d'électromigration qui

limite le courant de chauffage, une faible résistance électrique, une grande conductance thermique et une température de fusion faible. Ensembles, ces phénomènes limitent la température de chauffage à environ 100°C.

Ces différents avantages, désavantages, contraintes et limites de la structure à cavité enfouie en font un candidat intéressant pour les différents capteurs. Le capteur de pression Pirani profite de la possibilité de garder la distance membrane à substrat à quelques microns, soit une distance petite pour élargir la plage d'opération mais une distance suffisamment grande pour que les variations dans cette distance entre deux capteurs ou en cours d'opération ne viennent pas en perturber le comportement. Le capteur de gaz à base de couches sensibles et le capteur infrarouge tirent profit de la cavité profonde invisible de la surface, car elle facilite le dépôt et la mise en forme de couches supplémentaires après la libération de la membrane. Cependant, le fait que l'aluminium limite le chauffage à environ 100°C réduit la gamme de capteurs de gaz qui pourraient profiter de la structure. Le dépôt à basse température et la mise en forme supplémentaire sur la membrane fait d'un autre matériau (platine, polysilicium) permet de contourner cette difficulté. Le capteur de tension moyenne rms peut mettre à profit l'isolation thermique élevée du dispositif sous vide.

D'autres dispositifs peuvent aussi être fabriqués selon les principes de la structure à cavité enfouie. Par exemple, dans le cas des actuateurs, l'utilisation de la gravure sacrificielle de l'aluminium avant la gravure anisotrope élimine le phénomène de concentration de contraintes qui diminue le rendement de fabrication des cantilevers. De leur côté, pour les capteurs de contrainte de cisaillement dans les fluides, il est possible de boucher les ouvertures à la gravure sous vide et donc d'obtenir une cavité à faible pression, ce qui limite la conduction thermique sous la membrane.

Les quatre objectifs ont donc été remplis. Ils ont montré que la nouvelle structure, la structure à cavité enfouie répond mieux aux besoins de certains dispositifs thermiques que les méthodes traditionnelles, mais qu'elle a aussi ses limites. De nouvelles recherches et de nouveaux travaux pourraient cependant en repousser les limites encore plus loin, en étendre l'application à d'autres dispositifs MEMS, thermiques ou non et en faciliter l'analyse et l'utilisation dans le design de capteurs et actuateurs thermiques.

Bibliographie

- [1] JERMAN, H. (1995). Recent trends in silicon micromachining technology, Proc. Micromachined devices and components I, 3-8.
- [2] SARRO, P.M., FRENCH, P.J. et GENNISSEN, P.J.T (1996). New developments in the integration of micromachined sensors, , Proc. Micromachined devices and components II, 26-35.
- [3] 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.
- [4] RESSEJAC, I. (en cours). Projet de doctorat. École Polytechnique de Montréal, Canada.
- [5] 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. École Polytechnique de Montréal, Canada.
- [6] MARUSIC, J.C. (1997). Mémoire de maîtrise. École Polytechnique de Montréal, Canada.

- [7] LESSNICK, P. (1997). Transistors et résistances moléculaires à base de phtalocyanine pour la détection de l'ozone. École Polytechnique de Montréal, Canada.
- [8] ESSALIK, A., MARUSIC, J.C., CURRIE, J.F., PELLETIER-BOUDREAU, P.A., RICHARD, E. et LECLERC, S. (1997). Preparation and characterization of fully integrated gas sensors: the case of CO₂ sensor. Proc. 2nd Int. Symp. New materials for fuel cell and modern battery systems, 65-72.
- [9] SENTURIA, S.D. (1996). The future of microsensor and microactuator design. Sensors and actuators A, 56, 125-127.
- [10] VAN HERWAARDEN, S. (1987). Thermal vacuum sensors based on integrated silicon thermopiles, Thèse de doctorat. Université technique de Delft, Pays-Bas.
- [11] CARDINALI, G.C., DORI, L., FIORINI, I., FAGLIA, G., PEREGO, C., SBERVEGLIERI, G., LIBERALI, V., MALOBERTI, F. et TONNETTO, D. (1997). A smart sensor for carbon monoxide detection, Analog integrated circuits and signal processing, 14, 275-296.
- [12] SUEHLE, J.S., CAVICCHI, R.E., GAITAN, M. et SEMANCIK, S., (1993). Tin oxide gas sensor fabricated using CMOS micro-hotplates and in-situ processing. IEEE Electron devices letters, 14, 118-120.

- [13] CAVICCHI, R.E., SUEHLE, J.S., CHAPARALA, P., KREIDER, K.G., GAITAN, M. et SEMANCIK, S., (1994). Micro-hotplate gas sensor, Solid-state sensor and actuator workshop, Hilton Head, 53-56
- [14] SWART, N.R. et NATHAN, A. (1994). Design optimisation of integrated microhotplates, Sensors and actuators A, 43, 3-10.
- [15] KLAASSEN, E.H., REAY, R.J. et KOVACS, G.T.A., (1995). Diode-based thermal rms converter with on-chip circuitry fabricated using standard CMOS technology, Transducers '95, 154-157.
- [16] JAEGGI, D., FUNK, J. et BALTES, H. (1995). Overall system analysis of a CMOS thermal converter, Transducers '95, 112-115
- [17] VAN HERWAARDEN, A.W., HOCHSTENBACH, H.P., HARMANS, K.J.P.M. (1986). Integrated true rms converter, IEEE Trans. Inst. Meas., IM-35, 224-225.
- [18] SARRO, P.M., YASHIRO, H., VAN HERWAARDEN, A.W. et MIDDELHOEK, S. (1988). An integrated thermal infrared sensing array, Sensors and actuators, 14, 191-201.
- [19] LENGGENHAGER, R., BALTES H. et ELBEL, T. (1993). Thermoelectric infrared sensors in CMOS technology, Sensors and actuators A, 37-38, 216-220.
- [20] XU, Y.P., HUANG, R.S. et RIGBY, G.A. (1993). A silicon-diode-based infrared thermal detector array, Sensors and actuators A, 37-38, 226-230.

- [21] SHIE, J.S., CHEN, Y.M., OU-YANG, M. et CHOU, B.C.S. (1996). Characterization and modeling of metal-film microbolometer. J. Microelectromechanical systems, 5, 298-306.
- [22] FUNK, J., KORVINK, J.G., BÄCHTOLD, M., BÜHLER, J. et BALTES, H. (1996). Coupled 3D thermo-electro-mechanical simulations of microactuators, IEEE MEMS 96, 133-138.
- [23] MOON, E. et WISE, K.D. (1992). An integrated mass flow sensor with on-chip CMOS interface circuitry, IEEE Trans. Electron Devices, ED-39, 1376-1385.
- [24] WENG, P.K. et SHIE, J.S. (1994). Micro-Pirani vacuum gauge, Rev. Sci. Instrum., 65, 492-499.
- [25] KLAASSEN, E.H. (1996). Micromachined instrumentation systems, Thèse de doctorat. California Institute of Technology, États-Unis.
- [26] LECLERC, S. (1998). CMP-Mentor graphics MEMS-CAD software evaluation, Rapport technique pour la société de microélectronique du Canada (CMC), 74p.
- [27] ROSSI, C., SCHEID, E. et ESTEVE, D. (1997). Theoretical and experimental study of silicon micromachined microheater with dielectric stacked membranes, Sensors and Actuators A, 63, 183-189.

- [28] LIU, C., HUANG, J.B., ZHU, Z., JIANG, F., TUNG, S., TAI, Y.C. et HO, C.M., (1999). A micromachined flow shear-stress sensor based on thermal transfer principles. J. Microelectromechanical systems, 8, 90-99.
- [29] INCROPERA, F.P. et DEWITT, D.P. (1996). Fundamentals of heat and mass transfer, 4th edition, Wiley, New York.
- [30] ROBINSON, A.M., HASWELL, P., LAWSON, R.P.W. et PARAMESWARAN, M. (1992). A thermal conductivity microstructural pressure sensor fabricated in standard complementary metal-oxide semiconductor. Rev. Sci. Instrum., 63, 2026-2030.
- [31] LECLERC, S. et CURRIE, J.F. (1998). Novel simple and complementary metal-oxide-semiconductor -compatible membrane release design and process for thermal sensors. J. Vac. Sci. Tech. A, 16, 876-880.
- [32] SWART, N.R. et NATHAN, A. (1994). Coupled electrothermal modeling of microheaters using SPICE. IEEE Trans. Electron Devices, ED-41, 920-925.
- [33] SWART, N.R. et NATHAN, A. (1992). Flow-rate microsensor modelling and optimization using SPICE. Sensors and actuators A, 34, 109-122.
- [34] PETERSON, K.E. et GUARNIERI, C.R. (1979). Young's modulus measurements of thin films using micromechanics. J. Appl. Phys., 50, 6761-6706.

- [35] SCHWEITZ, J.A. (1992). Mechanical characterization of thin films by micromechanical techniques, MRS Bulletin, 34-45.
- [36] SOCIÉTÉ CANADIENNE DE MICROÉLECTRONIQUE (CMC) (1995). An introduction to Mitel's 1,5-micron CMOS technology to develop a Canadian MEMS process, Report IC 95-08, 134 p.
- [37] BALTES, H., KORVINK, J.G. et PAUL, O. (1995). Numerical modelling and materials characterisation for integrated micro electro mechanical systems, Simulation of semiconductor devices and processes, 6, 1-9.
- [38] GERLACH, G., SCHROTH, A. et PERTSCH, P. (1996). Influence of clamping conditions on microstructure compliance, Sensors and materials, 8, 79-98.
- [39] MULLEN, R.L., MEHREGANY, M., OMAR, M.P. et KO, W.H. (1991). Theoretical modeling of boundary conditions in microfabricated beams, Transducers '91, 154-159.
- [40] JENSEN, B.D., BITSIE, F. et DE BOER, M. (1999). Interferometric measurement for improved understanding of boundary effects in micromachined beams, SPIE Conf. Materials and device characterization in micromachining II, 61-72.
- [41] FANG, W., LEE, C.H. et HU, H.H. (1999). On the buckling behavior of micromachined beams, J. Micromech. Microeng., 9, 236-244.

- [42] SCHNEIDER-MAIER, D., MAIBACH, J. et OBERMEIER, E. (1995). A new analytical solution for the load-deflection of square membranes. J. Microelectromechanical systems, 4, 238-241.
- [43] HÄLG, B. (1990). On a micro-electro-mechanical nonvolatile memory cell. IEEE Trans. Electron Devices, ED-37, 2230-2236.
- [44] OHRING, M. (1992). The materials science of thin films. Academic Press, Boston. 704p.
- [45] CRC Handbook of chemistry and Physics 1999-2000, (1999), 80th edition, CRC Press, Boca Raton.
- [46] LENGGENHAGER, R., JAEGGI, D., MALCOVETI, P., DURAN, H. et BALTES, H., (1994). CMOS Membrane infrared sensors and improved TMAHW etchant. IEDM 94, 531-534.
- [47] BÜHLER, J., FUNK, J., PAUL, O., STEINER, F.P. et BALTES, H. (1995). Thermally actuated CMOS micromirrors. Sensors and actuators A, 46-47, 572-575.
- [48] CHOU, B.C.S., et SHIE, J.S. (1997). An innovative Pirani pressure sensor. Transducers '97, 1465-1468.
- [49] LECLERC, S., LECOURS, A., CARON, M., RICHARD, E., TURCOTTE, G. et CURRIE, J.F. (1998). Electron cyclotron resonance plasma chemical vapor

deposited silicon nitride for micromechanical applications, J. Vac. Sci. Tech. A, **16**, 881-884.

- [50] REAY, R.J., KLAASSEN, E.H. et KOVACS, G.T.A. (1995). A micromachined low-power temperature-regulated bandgap voltage reference, IEEE J. Solid-State Circuits, **30**, 1374-1381.
- [51] RIETHMULLER, W. et BENECKE, W. (1988). Thermally excited silicon microactuators, IEEE Trans. Electron Devices, **ED-35**, 758-763.
- [52] CHU, W.H., MEHREGANY, M. et MULLEN, R.L. (1993). Analysis of tip deflection and force of a bimetallic cantilever microactuator, J. Micromech. Microeng., **3**, 4-7.
- [53] READ, B.C., BRIGHT, V.M. et COMTOIS, J.H. (1995). Mechanical and optical characterization of thermal microactuators fabricated in a CMOS process, Proc. Micromachined devices and components I, 22-32.
- [54] PARAMESWARAN, M., RISTIC, L.J., ROBINSON, A.M., CHAU, K. et ALLEGRETTO, W., (1991). Electrothermal microactuators in standard CMOS process, Sensors and materials, **2**, 197-205.
- [55] JAEGGI, D. (1993). Thermal converters by CMOS Technology. Thèse de doctorat. ETH Zurich, Suisse.

- [56] PETERSON, K.E. (1978). Dynamic micromechanics on silicon : techniques and devices. IEEE Trans. Elec. Dev., ED-25, 1241-1249.
- [57] NASEH, S. (1995). Experimental investigation of anisotropic etching of silicon in tetra-methyl ammonium hydroxide. Mémoire de Maîtrise. Université Concordia. Canada.
- [58] POLLAK-DIENER, G., LIN, J., OBERMEIER, E. (1993). Micromachined gas sensor using the dependence of heat conductivity on gas concentration. The 7th international conference on solid-state sensors and actuators, 364-367.
- [59] OFFEREINS, H.L., SANDMAIER, H., MARUSCYK, K., KÜHL, K. et PLETTNER, A. (1992). Compensating corner undercutting of (100) silicon in KOH. Sensors and materials, 3, 127-144.
- [60] KLAASSEN, E.H. et KOVACS G.T.A. (1996). Integrated thermal conductivity vacuum sensor. Solid-state sensor and actuator workshop, Hilton Head, 249-252.
- [61] BÜHLER, J., STEINER, F.P. et BALTES, H. (1997). Silicon dioxide sacrificial layer etching in surface micromachining. J. Micromech. Microeng., 7, R1-R13.
- [62] TANG, W.C., NGYYEN, T.C.H. et HOWE, R.T. (1989). Laterally driven polysilicon resonant microstructures. Sensors and actuators, 20, 25-32.
- [63] PAUL, O. et BALTES, H. (1995). Novel fully CMOS-compatible vacuum sensor, Sensors and actuators A, 46-47, 143-146.

- [64] PAUL, O., WESTBERG, D., HORNING, M., ZIEBART, V. et BALTES, H. (1997). Sacrificial aluminum etching for CMOS microstructures. IEEE MEMS '97, 523-527.
- [65] WESTBERG, D., PAUL, O., ANDERSSON, G.I. et BALTES, H., (1996). Surface micromachining by sacrificial aluminium etching. J. Micromech. Microeng., 6, 376-384.
- [66] KLAASSEN, E.H., REAY, R.J., STORMENT, C., AUDY, J., HENRY, P., BROKAW, A.P. et KOVACS, G.T.A. (1996). Solid-state sensor and actuator workshop, Hilton Head, 127-131.
- [67] WESTBERG, D., PAUL, O., ANDERSSON, G.I. et BALTES, H. (1999). A CMOS-compatible device for fluid density measurements fabricated by sacrificial aluminium etching. Sensors and Actuators A, 73, 243-251.
- [68] LEE, S., PARK, S. et CHO, D. (1999). The surface/bulk micromachining (SBM) process : a new method for fabricating released MEMS in single crystal silicon. J. Microelectromechanical systems, 8, 409-418.
- [69] EAGLE, S., LAKDAWALA, H. et FEDDER, G.K., (1999). Design and simulation of thermal actuators for STM applications in a standard CMOS process. SPIE Conf. Materials and device characterization in micromachining II, 32-39.

- [70] BARSONY, I., ADAM, M., KOLEV, S.D., DUCSO, CS., VAZSONYI, E., SZABO, L et VAN DEN BERG, A. (1998). Fast, efficient bulk micromachined heater for integrated sensor applications. Proc. Eurosensors XII, 905-908.
- [71] EATON, W.P. et SMITH, J.H. (1996). Planar surface-micromachined pressure sensor with a sub-surface, embedded reference pressure cavity, Proc. Micromachined devices and components II, 259-265.
- [72] SUGIYAMA, S., SUZUKI, T., KAWAHATA, K. et SHIMAOKA, K. (1986). Micro-diaphragm pressure sensor. IEDM '86, 184-187.
- [73] TABATA, O., SHIMAOKA, K., ASAH, R. et SUGIYAMA, S. (1996). Micromachined sensors using polysilicon sacrificial layer etching technology. Sensors and materials, 8, 57-67.
- [74] OHNSTEIN, T., FUKIURA, T., RIDLEY, J. et BONNE, U. (1990). Micromachined silicon microvalve. IEEE MEMS '90, 95-98.
- [75] KUNG, J.T. et LEE, H.S. (1991). An integrated air-gap-capacitor process for sensor applications. IEEE MEMS '91, 1010-1013.
- [76] MURARKA, S.P. et PECKERAR, M.C. (1989). Electronic materials, Science and technology, Academic Press, Boston, 622p.

- [77] JAEGGI, D., AZEREDO LEME, C., O'LEARY, P. et BALTES H. (1993). Improved CMOS AC power sensor. The 7th international conference on Solid-state sensors and actuators, 462-465.
- [78] SUH, J.W., STORMENT, C.W. et KOVACS, G.T.A. (1995). Characterization of multi-segment thermal actuator. Transducers '95, 333-336.
- [79] ATAKA, M., OMODAKA, A., TAKESHIMA, N. et FUJITA, H. (1993). Fabrication and operation of polyimide bimorph actuators for a ciliary motion system. J. Microelectromechanical systems, 2, 146-150.
- [80] GOLDMAN, K. et MEHREGANY, M., (1995). A novel micromechanical temperature memory sensor. Transducers '95, 132-135.
- [81] MATOBA, H., ISHIKAWA, T., KIM, C.J., MULLER, R.S. (1994). A bistable snapping microactuator. IEEE MEMS '94, 45-50.
- [82] GAJDA, M.A. et AHMED, A. (1995). Applications of thermal silicon sensors on membranes. Sensors and actuators A, 49, 1-9.
- [83] VAN HERWAARDEN, S. (1996). Physical principles of thermal sensors. Sensors and materials, 8, 373-387.
- [84] GILBERT, B. (1998). Design for manufacture. Mead Analog design course (December 1998), Monterey, Californie.

- [85] HOFMANN, K., GLESNER, M., SEBE, N., MANOLESCU, A., MARCO, S., SAMITIER, J., KARAM, J.-M., COURTOIS, B., (1997). Generation of the HDL-A-model of a micromembrane starting from its finite-element-description, European Design & Test Conf. 97, 108-111.
- [86] ROMANOWICZ, B., LAUDON, M., LERCH, P., RENAUD, P., AMANN, H.P., BOEGLI, A., MOSER, V. et PELLANDINI, F., (1997). Modeling and simulation of electromechanical transducers in microsystems using an analog hardware description language, European Design & Test Conf. 97, 119-123.