

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

MEMOIRE DE MAGISTER

en **Electronique**, option **Microélectronique**

Présenté par :

SIDI SAID Amel

ETUDE DE LA FIABILITE D'UN MICROCAPTEUR ANEMOMETRIQUE EN TECHNOLOGIE MEMS

Mémoire soutenu le : 03 /12 / 09 devant le jury d'examen composé de :

BELKAID Mohamed Saïd	Professeur à l' UMMTO	Président
LAGHROUCHE Mourad	Maître de conférences à l'UMMTO	Rapporteur
BENFDHILA Arezki	Professeur à l'UMMTO	Examineur
ZIANI Rezki	Maître de conférences à l'UMMTO	Examineur

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire LATAGE (Laboratoire des Technologies Avancées du Génie Electrique) de la Faculté de Génie Electrique et Informatique de L'UMMTO. Je tiens à cet effet à remercier Mr le Directeur, BELKAID M^{ed} Said, Professeur, Doyen de la Faculté de Génie Electrique et d'Informatique, qui m'a accueilli et mis à ma disposition tous les moyens nécessaires. Je le remercie également d'avoir bien voulu accepter de présider le jury d'examen.

Mes vifs remerciements à mon Promoteur, Mr LAGROUCHE Mourad, Maître de conférence pour le sujet, les précieux conseils prodigués ainsi que le suivi tout au long de ce travail.

Mes remerciements vont également à Mr BENFDHILA Arezki, Professeur à UMMTO, Mr ZIANI Rezki, Maître de conférence, chef du département d'Electronique, pour avoir accepté de faire partie des membres du jury.

Je remercie tous ceux qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Je remercie ma famille qui m'a toujours soutenue et mes amis (es).

SOMMAIRE

Introduction :	1
----------------	---

Chapitre I : La Technologie MEMS et Techniques de Fabrication

I. Les Microsystems:	3
I.1. Technologies MEMS:	3
I.1.1. Le micro-usinage en surface :	3
I.1.2. Le micro-usinage en volume:	4
I.1.3. LIGA :	5
I.1.4.HARSE.....	7
I.2. Applications et spécificités technologiques	8
I.3. Le polysilicium et ses propriétés.....	10
I.3.1.Dépôt de la couche de silicium polycristallin.....	10
I.3.2.Dopage du polysilicium.....	11
I.3.3.Influence du dépôt et du recuit sur sa structure.....	11
I.3.4.Propriétés électriques et mécaniques du polysilicium.....	13
II. Principaux moyens technologiques de fabrication des MEMS.....	17
II.1 Dépôt en phase vapeur chimique:.....	17
II.1.1. Le dépôt CVD assisté par plasma (PECVD) :.....	19
II.2. Dépôt en phase vapeur physique	20
II.2.1 Pulvérisation cathodique.....	20
II.3 La lithographie.....	21
II.4. Principe et méthode de gravure.....	24
II.4.1. La gravure humide :	25
II.4.2. Gravure plasma.....	26
II.5. Implantation ionique	27
III. Techniques de caractérisations utilisées.....	29
III.1.La microscopie électronique à balayage MEB.....	29
III.2. La microscopie à force atomique AFM.....	30
III.2.1. Principe général.....	30
III.2.2. la détection.....	31

Chapitre II : Défauts de microsystemes et Fiabilité

I. Fiabilité des microsystemes.....	32
I.1.Approches de la fiabilité des microsystemes.....	32
I.1.1.Fiabilité d'un procédé technologique	32
I.1.2.Fiabilité d'un système complet.....	32
II. Mécanismes de défaillances des microsystemes.....	33
II.1.Défauts technologiques de la structure.....	33
II.2.Mécanismes de défaillances induits par le fonctionnement.....	36
II.2.1.Le collage.....	36
II.2.2.Fatigue mécanique.....	36
II.2.3.Usure.....	37
II.2.4.Fluage.....	38
II.2.5. Chocs et vibrations.....	38
II.2.6.Influence de l'humidité sur les microsystemes.....	39
III. Encapsulation.....	40

Chapitre III : Elaboration et Réalisation du microcapteur

I- L'anémomètre à fil chaud :	41
1-1. Introduction	41
I-2. Principe de l'anémomètre à fil chaud:	41
I-3. Construction de l'anémomètre :	42
II. Défaut de réalisation de la structure	49
II.1. Le collage du fil en polysilicium.....	49
II.2.défauts de gravure.....	50
III. Caractérisation électrique de l'anémomètre.....	53

III. 1. L'influence de la géométrie du fil sur le courant parcouru :	53
III. 2. Dépendance de la résistivité avec la température:	54
III. 2.1. Essais sur les échantillons réalisés :	54
III. 2.2. Influence du dopage polysilicium sur le coefficient de température:	57

Chapitre IV : Etude de la fiabilité de l'anémomètre à fil chaud

I Introduction :	61
II. Définition et optimisation des tests:	61
II. 1 Test Statique	61
II. 2. Particularités observées pendant les tests	62
II.2.1. Adhésion du fil chaud avec le substrat :	62
II.2.2. Flambement du capteur à fil chaud:	63
II.3. Le test de vieillissement :	64
II.4. Test destructif du capteur :	66
III. Analyse de la fiabilité:.....	67
III. 1. Dérives en température ambiante:	67
III .1.1. La compensation des dérives en température.....	67
III. 2. Bruit basse fréquence:	68
III.2.1. Mesure du bruit 1/f.....	69
III.2.2. La chaîne de mesure de bruit.....	70
III.2.3. Modélisation du bruit 1/f.....	70
III.2.4. Résultat de la mesure du bruit.....	72
III.3. Influence de la corrosion chimique.....	74
III.3.1. Réalisation des échantillons corrodés.....	74
III.3.2. Test de corrosion chimique.....	75
III .4. L'électromigration.....	76
Conclusion :	77
Bibliographie :	78

Introduction

Introduction

Un *MEMS* (Micro Electro Mechanical System) est un système miniaturisé intelligent qui combine des capteurs et des actionneurs à des fonctions de traitement du signal et de l'information. Ce terme laisse donc apparaître la notion de multidisciplinarité propre à ces systèmes. En effet, les signaux utilisés sont aussi bien mécaniques, électroniques qu'optiques, thermiques,...

Les MEMS (aussi désignés sous l'appellation de *Microsystèmes* en Europe ou *Micromachines* au Japon) réunissent un ensemble de composants réalisés le plus souvent sur silicium à l'aide de microtechnologies. Leur particularité est d'employer des technologies microélectroniques pour réaliser des dispositifs qui, en plus d'être des circuits électroniques, sont des capteurs et des actionneurs. La partie électronique est fabriquée en utilisant les procédés de fabrication des circuits intégrés (par exemple CMOS, Bipolaire, BICMOS), tandis que les parties mécaniques sont fabriquées à l'aide de procédés qui éliminent certaines parties du wafer ou ajoutent de nouvelles couches structurelles pour former le dispositif mécanique.

Le matériau de base du micro-usinage de surface est le silicium polycristallin. Il constitue généralement les éléments mécaniques du microsystème réalisé, et des éléments électriquement actifs. Les métaux sont généralement utilisés uniquement pour la réalisation de contacts électriques, de façon similaire à ce qui se fait en microélectronique.

Comparativement aux capteurs classiques ayant des fonctions équivalentes, les capteurs MEMS sont moins sensibles au bruit causé par le milieu, comme le rayonnement électromagnétique, de sorte qu'ils permettent une transmission plus claire des signaux. Comme ils sont à la fois très légers et très petits, ces dispositifs peuvent être intégrés en grand nombre dans divers types d'équipement et ils peuvent être facilement transportés. Leur faible consommation d'énergie est un autre atout précieux. Toutefois, la véritable raison de la popularité des systèmes MEMS est qu'ils peuvent être facilement fabriqués en série, comme les circuits intégrés (CI), donc à très faible coût. A cet effet, nous avons développé un micro capteur anémométrique à base de la technologie MEMS, avec les avantages suivants : une grande résolution spatiale, un temps de réponse relativement court et une faible consommation d'énergie électrique. En plus, on espère une augmentation de la fiabilité et des performances (réduction du bruit, augmentation de la précision) ainsi que des temps de développement réduits.

L'étude de la fiabilité des microsystèmes s'avère nécessaire vu leurs complexités, l'hétérogénéité des matériaux utilisés et leurs interfaces avec l'environnement extérieur. Pour définir la fiabilité d'un tel système, il faut recenser les mécanismes de défaillances introduisant un comportement défaillant du dispositif à plus ou moins long terme.

Cependant dans le domaine des microsystèmes, en l'état actuel des recherches, les travaux portent encore sur l'identification des mécanismes de défaillance. Pour cela, les structures sont observées en fin de fabrication mais aussi pendant des tests de vieillissement et des caractérisations électriques.

Le mémoire est organisé autour de quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, on présente les procédés de fabrication des MEMS et ses applications, les propriétés du silicium polycristallin, matériau le plus utilisé pour la fabrication en surface des dispositifs microsystèmes et les techniques de fabrication des MEMS.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de la fiabilité et les défauts des microsystèmes, la méthodologie de caractérisation afin d'évaluer la fiabilité des microsystèmes et leurs apporter d'éventuelles actions correctives.
- Le troisième chapitre traite la réalisation du capteur à fil chaud de silicium polycristallin et les mécanismes de défaillances induits par sa fabrication et l'étude de la dépendance de la résistivité de la microsonde avec la température TCR (Temperature Resistivity Coefficient) en fonction du dopage.
- Le quatrième chapitre porte sur l'application de différentes contraintes environnementales (corrosion atmosphérique, température) afin de mettre en évidence d'éventuels mécanismes de défaillance. Des tests de fiabilité ont été réalisés pour déterminer la durée de vie du capteur.

La conclusion synthétise les résultats obtenus et donne un aperçu des perspectives qui peuvent être développées.

Chapitre I

La Technologie MEMS et Techniques de Fabrication

I. LES MICROSYSTEMES

Un *MEMS* (Micro Electro Mechanical System) est un système microélectronique composé d'éléments électroniques analogiques et numériques mais aussi d'éléments électromécaniques destinés à assurer des fonctions de capteurs ou d'actionneurs. L'électronique est fabriquée en utilisant les procédés de fabrication des circuits intégrés (par exemple CMOS, Bipolaire, BICMOS), tandis que les parties mécaniques sont fabriquées à l'aide de procédés qui éliminent certaines parties du wafer ou ajoutent de nouvelles couches structurales pour former le dispositif mécanique [1-8]. L'association de la microélectronique sur silicium avec la technologie de micro-usinage a rendu possible la réalisation de systèmes sur puce complets. Ces composants profitent à la fois d'une extrême miniaturisation et d'un rapport performance/coût très avantageux du fait de leur capacité à être produits en série par les procédés de fabrication collective.

Selon les applications envisagées, différents matériaux peuvent être utilisés pour fabriquer des systèmes MEMS. Le nickel est un matériau largement utilisé. Il est bon marché et on peut lui donner la forme voulue en se servant d'un masque de plexiglas ou en ayant recours à des techniques photolithographiques. Cependant, l'utilisation du silicium polycristallin [8-11] s'est révélée être appropriée à un bon nombre d'applications.

I.1. Technologies MEMS

Il existe deux familles de technologies MEMS qui se démarquent : le micro-usinage en surface et en volume. Le procédé LIGA permet de réaliser des microsystèmes Hybrides.

I.1.1. Le micro-usinage en surface

Le micro-usinage en surface (Surface micromachining) est la technique de gravure sélective qui consiste à enlever sélectivement une des couches pré-déposée, cette couche est appelée couche sacrificielle (Figure 1). Tout d'abord la couche sacrificielle est déposée sur le substrat. Une couche de matériau destinée à la réalisation de la partie mécanique, appelée couche structurale, est ensuite déposée sur la couche sacrificielle. Finalement la couche sacrificielle est enlevée par micro-gravure pour laisser la partie mécanique suspendue. La couche sacrificielle est choisie en fonction de la couche qui constituera la structure mécanique. Le facteur important est la disponibilité d'une solution de gravure pouvant supprimer la couche sacrificielle sans attaquer la couche servant à la structure mécanique et le substrat. La combinaison couramment utilisée est une couche sacrificielle en oxyde associée à

une couche de polysilicium comme structure mécanique. Cette technique est utilisée pour la production de nombreux et divers MEMS. La figure 2 montre un exemple de structure micro usinée en surface.

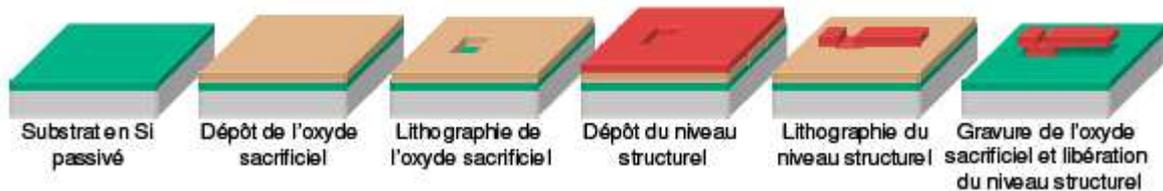


Figure 1: Micro-usinage en surface

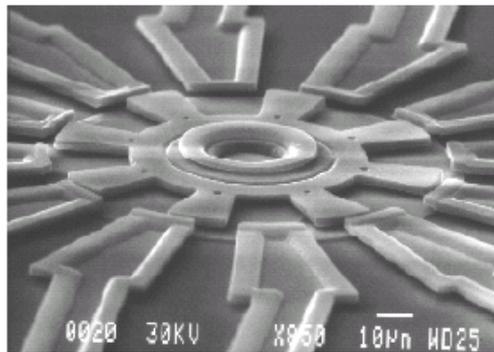


Figure 2: Exemple de structure micro-usinée par gravure en surface (micromoteur, source SANDIA National Labs) [7]

I.1.2. Le micro-usinage en volume

Le micro-usinage en volume est un procédé permettant de fabriquer des structures suspendues par gravure du substrat d'un circuit intégré. On utilise pour cela généralement une gravure humide, avec des solutions chimiques de gravure adaptées. Dans le cas d'une gravure anisotrope (des directions préférentielles de gravure) fréquemment utilisée, la vitesse de gravure varie suivant l'orientation des plans attaqués et la sélectivité de la solution de gravure (KOH, TMAH, EDP...). Ces caractéristiques donnent la forme finale à la topologie du substrat (Figure 3). La figure 4 montre un exemple de MEMS réalisé en micro-usinage en volume.

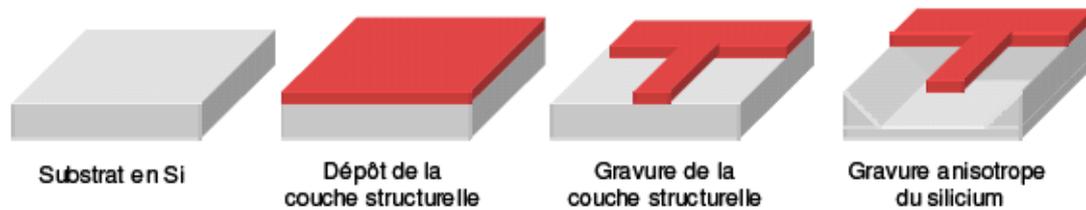


Figure 3 : Micro-usinage en volume

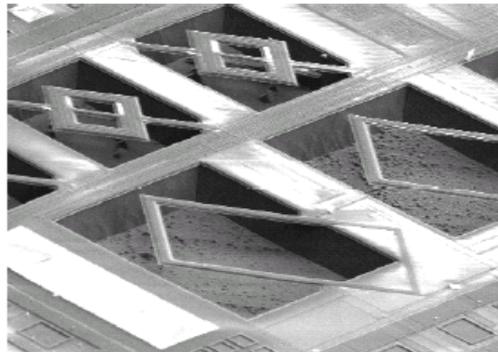


Figure 4 : Exemple de réalisation en micro-usinage en volume [7]

I.1.3. LIGA

LIGA (Lithographie, Galvanoformung, Abformung) est un procédé de fabrication de microstructures à très grand facteur de forme. Les pièces réalisées en 3 étapes (lithographie, électrodéposition et moulage) comme le montre la figure 5 sont en matériaux plastiques et peuvent atteindre jusqu'à 1 mm d'épaisseur pour des dimensions latérales minimales de 0,2 μm . La force de la technologie LIGA est de pouvoir créer des micromécanismes très précis développant des puissances mécaniques satisfaisantes irréalisables avec les procédés de fabrication microélectroniques. Les applications sont essentiellement mécaniques (joints, ressorts, engrenages, microrelais ...), c'est pourquoi nous parlerons plutôt de microactionneurs. La figure 6 donne un exemple de réalisation par LIGA.

Le LIGA présente l'inconvénient majeur d'être coûteux compte tenu de la nécessité d'utiliser un synchrotron pour réaliser une lithographie profonde par rayons X. En revanche, une fois le moule en métal achevé par électrodéposition, il devient aisé de procéder à une

production en masse des pièces. D'autre part, ce type de procédé ne permet pas l'intégration des fonctions de traitement électroniques. Les systèmes réalisés ne peuvent être qu'hybrides c'est-à-dire que la technologie liée au capteur ou à l'actionneur est différente de celle des fonctions de traitement électroniques associées.

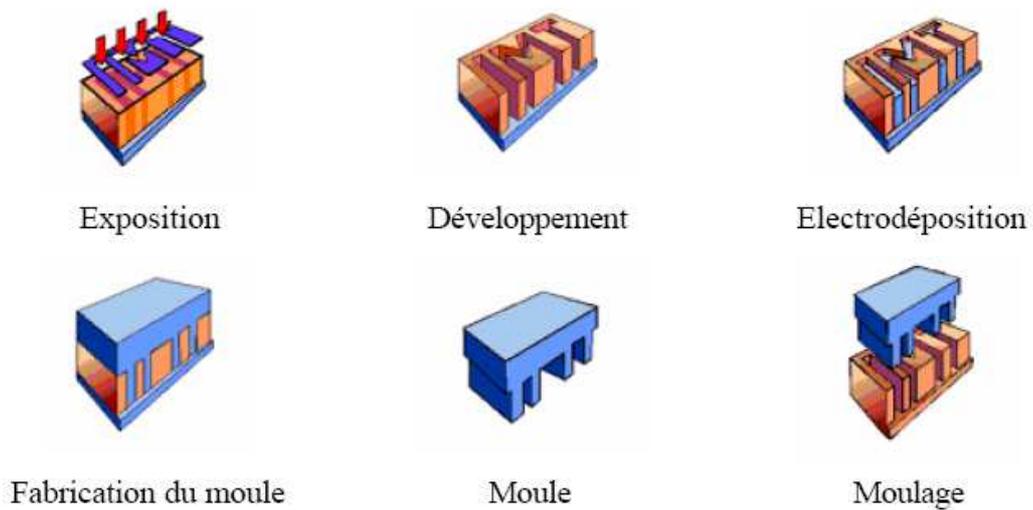


Figure 5 : Etapes principales du procédé LIGA

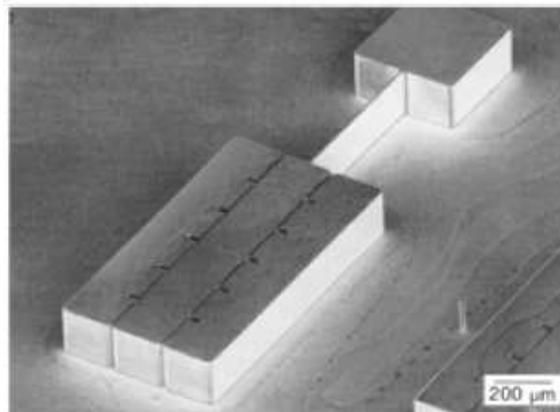


Figure 6 : Exemple de réalisation par LIGA : Accéléromètre [9]

I.1.4. HARSE

Le coût élevé de la technologie LIGA a conduit certains technologues à rechercher de nouveaux moyens d'usinage tridimensionnel. Ainsi est né le HARSE (High Aspect Ratio Silicon Etching) dont le principe repose sur la lithographie par rayons ultraviolets de résines photosensibles (voir Figure 7). Cette technologie est aussi connue sous les noms de LIGA LIKE ou LIGA UV.

Les importants progrès réalisés ces dernières années dans les dispositifs optiques de lithographie des couches épaisses ainsi que dans la connaissance des résines, permettent d'atteindre des structures de quelques centaines de microns d'épaisseur. Les moules en résine ainsi réalisés permettent ensuite la fabrication des structures par électrodéposition. Si cette méthode ne permet pas encore d'atteindre la verticalité et les résolutions latérales du LIGA en revanche elle présente les avantages d'être bon marché, reproductible, et compatible avec les technologies microélectroniques. De plus, couplée à la technique des couches sacrificielles, elle offre la possibilité de créer de nouvelles structures complexes.



Figure 7 : Exemple de réalisation par HARSE [12]

I.2. Applications et spécificités technologiques

Il existe énormément de prototypes de MEMS, MOEMS (Micro Opto Electro Mechanical System), BIOMEMS...; peu ont cependant franchi la phase d'industrialisation. Nous donnons en exemple quelques applications de MEMS qui démontrent pourtant le fort potentiel des microtechnologies.

I.2.1. la micro-fluidique

Les têtes à jet d'encre sont réalisées avec des technologies MEMS depuis les années 80. L'optimisation des micropompes (Figure 8) permet de réaliser des caractères toujours plus fins et nets. Mais ces pompes trouvent aussi une application dans le médical, où elles peuvent par exemple être utilisées pour l'injection sous-cutanée d'insuline à faible dose.

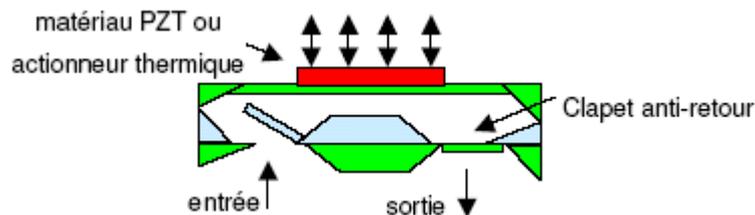


Figure 8 : Principe de la micropompe

L'anémomètre à fil chaud est un capteur de mesure de la vitesse de l'écoulement d'un fluide fabriqué en technologie MEMS [1,2]. Ce fil chauffé est placé dans un écoulement, à l'équilibre, la puissance électrique nécessaire pour le chauffer à une température T supérieure à la température du fluide est égale à la quantité de chaleur Q dissipée dans l'écoulement.

I.2.2. la mécanique

Les capteurs de pression existent sur le marché depuis longtemps. Une différence de pression entraîne la déformation d'une membrane qui peut être mesurée. On en déduit la pression extérieure au MEMS. Les accéléromètres sont une application plus récente dont le succès est aussi très important, notamment dans le domaine de l'automobile, où ils sont utilisés pour commander l'ouverture des airbags en cas de choc.

Analog Devices utilise le microusinage en surface pour la réalisation de l'accéléromètre (Figure9).



Figure 9 : Accéléromètre réalisé en usinage de surface [7]

I.2.3. L'optique

L'application mise en avant pour les MOEMS est la DLP de Texas Instruments (Digital Light Processing). Son ambition est tout simplement de remplacer les écrans conventionnels de télévision ou d'ordinateur par un ensemble de micromiroirs, associés chacun à un pixel. Leur intérêt est le faible encombrement du moniteur et une résolution de qualité numérique. Ce système est déjà utilisé dans des salles de cinéma par ce que l'on appelle des projecteurs numériques. Les films ne sont plus sur bandes, mais sur des supports d'informations numériques. Ce nouveau marché est, comme celui de l'automobile, des plus prometteur.

I.2.4. Applications Radio-Fréquence (RF)

Le marché des télécommunications motive les entreprises impliquées dans les MEMS car il est souvent rentable à court terme, mais il ne connaît pas encore de succès industriel impliquant un MEMS. Les développements dans ce domaine concernent notamment les capacités, les inductances, les transformateurs, les filtres et les microrelais. Ces systèmes ne comportent pas forcément de parties mécaniques, mais le terme de microsystèmes s'élargit de plus en plus et englobe aujourd'hui l'ensemble des systèmes réalisés à partir de microtechnologies.

I.3. Le polysilicium et ses propriétés

Le matériau le plus utilisé pour la fabrication en surface des dispositifs MEMS est le silicium polycristallin (Si) comme matériau structural primaire, SiO₂ comme matériau sacrificiel, et Si₃N₄ pour l'isolement électrique des structures de dispositifs.

Le cristal de polysilicium, dont la structure peut être colonnaire ou granulaire (Figure10), est constitué de grains de silicium monocristallins d'orientations cristallines différentes qui sont séparés par des joints de grains. Dans chaque grain, les atomes sont arrangés d'une façon périodique, alors que les joints de grains se composent d'atomes désordonnés et contient un grand nombre de défauts [8,35].

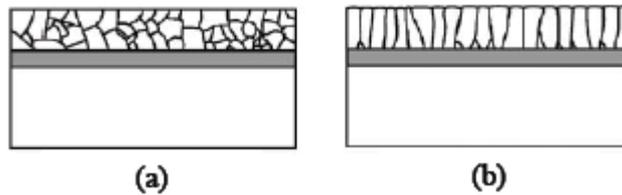


Figure 10 : Structure granulaire (a) et colonnaire (b) du polysilicium.

I.3. 1. Dépôt de la couche de silicium polycristallin

La méthode la plus utilisée actuellement pour déposer du silicium polycristallin est la technique LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) [2,8,10].

Le dépôt LPCVD est réalisé par la pyrolyse (c'est-à-dire la décomposition thermique) d'une source de silicium dans une gamme de température allant de 300°C à 900°C. Les sources les plus courantes de silicium sont le silane (SiH₄), de loin le plus employé, le dichlorosilane (SiH₂Cl₂) et le disilane (Si₂H₆). Le dopage in situ des films est possible par l'ajout d'un gaz porteur du dopant que l'on souhaite incorporer. La pression dans le four de dépôt varie de 0,3 à 1 Torr. L'équation de réaction pour le silane est donnée par :



La vitesse du dépôt dépend de la température, et de la pression totale dans le four lors du dépôt, et du type de gaz porteur utilisé. On utilise généralement des gaz porteurs inertes (Argon, Helium).

I.3. 2. Dopage du polysilicium

L'implantation ionique permet d'introduire des impuretés dans un substrat grâce à l'énergie cinétique qui leur est fournie dans un accélérateur.

La distribution en profondeur des impuretés est contrôlée par l'énergie du faisceau d'ions et la quantité totale introduite (la dose) est contrôlée en mesurant le courant électrique.

L'implantation ionique permet d'atteindre une excellente résolution en surface ainsi qu'une précision en profondeur de quelques dizaines de nanomètres. Cette étape est suivie d'un recuit : les ions incidents ont créé des défauts ou une amorphisation modifiant les propriétés électriques du matériau et les impuretés occupent des sites interstitiels électriquement neutres[10]. Il est donc nécessaire d'effectuer un recuit de redistribution afin de diminuer la proportion de défauts et de déplacer les impuretés sur des sites substitutionnels sur lesquels elles seront électriquement actives.

Les deux dopants principalement utilisés en micro-électronique pour le silicium sont le phosphore (dopant de type N), et le bore (dopant de type p). La ségrégation aux joints de grains a lieu particulièrement pour les dopants de type N tels que le phosphore et l'arsenic pour cela on préfère généralement l'éviter dans le silicium polycristallin. Par contre, elle reste négligeable dans le cas du bore [2,16].

I.3. 3. Influence du dépôt et du recuit sur sa structure

Les paramètres à prendre en compte lors d'un dépôt LPCVD sont la température du dépôt, la pression, le débit, et la durée du dépôt. La température est un paramètre primordial.

En fonction de la température de dépôt, on distingue deux types de dépôts séparés par une température de transition T_t dont la valeur varie selon que le polysilicium soit déposé dopé ou non et, dans le dernier cas, selon le niveau de dopage (Figure 11). Par contre, elle ne dépend pas du type de gaz utilisé.

-Si la température de dépôt est inférieure à T_t , les dépôts sont généralement amorphes (figure 12). Au fur et à mesure que la température de dépôt diminue, la taille des grains ne change pas alors que l'épaisseur de la couche amorphe augmente.

- Si le silicium est déposé à une température supérieure à T_t , il est alors polycristallin et sa structure est colonnaire (figure 13).

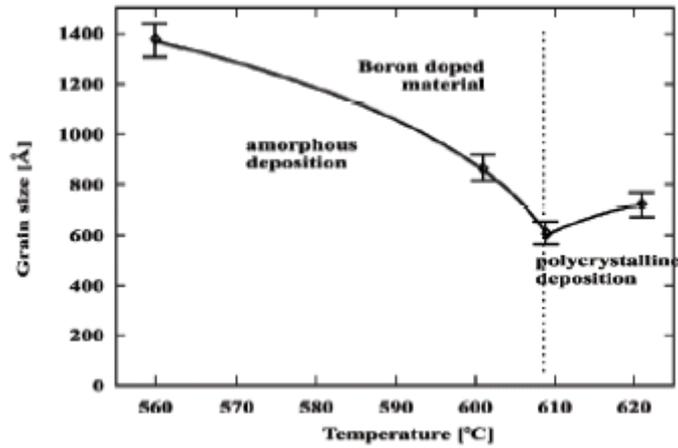


Figure 11 : Taille des grains du polysilicium implanté bore et recuit à 1000°C en fonction de la température de dépôt [8].

Le recuit d'activation revêt une importance particulière pour que la couche amorphe prenne l'orientation cristalline des grains adjacents et se réduise. Ainsi, le polysilicium obtenu par cristallisation en phase solide du silicium amorphe présente des grains de taille nettement supérieure à celle du polysilicium obtenu directement par dépôt.

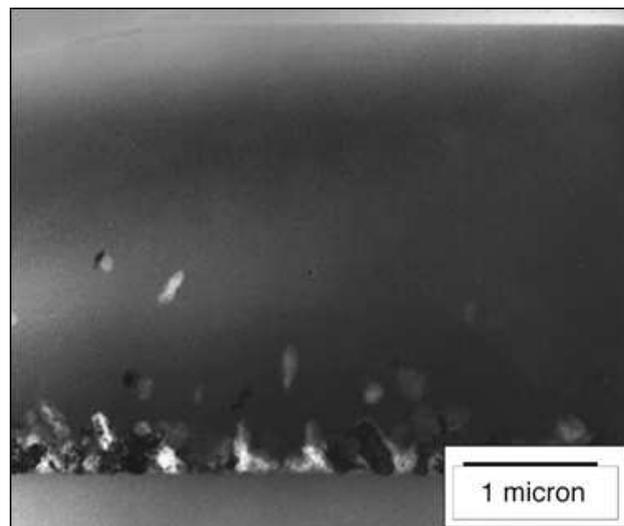


Figure 12 : TEM micrographie d'un film de silicium polycristallin amorphe Si déposé à 570°C [10]

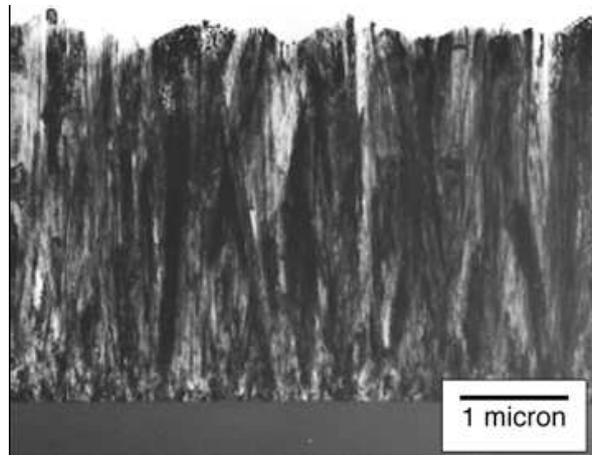


Figure (13) : TEM micrographie d'un film polysilicium déposé à 620°C [10]

L'orientation cristalline des grains du polysilicium dépend de la température du dépôt. Dans des conditions standards de dépôt par LPCVD (100% SiH_4 , 200mtorr). L'orientation du cristal du polysilicium est principalement (110) pour une température de substrat de 600°C à 650°C. En revanche, l'orientation (100) est dominante pour une température de substrat allant de 650°C à 700°C [10].

I.3. 4. Propriétés électriques et mécaniques du polysilicium

I.3.4.1. Propriétés mécaniques

Bien qu'ayant des propriétés mécaniques inférieures à celles du silicium monocristallin, le silicium polycristallin a de bien meilleures propriétés que les métaux. Le phénomène de fatigue, propre aux métaux, n'est en effet pas présent dans ce semi-conducteur. Son module d'Young est, de plus, plus élevé (160 GPa en moyenne pour du silicium polycristallin, contre 70 GPa pour un film mince d'Aluminium déposé en micro-électronique).

Une comparaison globale des propriétés mécaniques peut être effectuée entre le silicium monocristallin et le silicium polycristallin [6] :

	silicium monocristallin	silicium polycristallin
Module d'Young	190 GPa <111>	160 GPa
coefficient de Poisson	0.262 maximum (pour <111>)	0.23
Contrainte résiduelle	aucune	variable selon la méthode de dépôt et les cycles thermiques
Résistance à la rupture	6 GPa	de 0.8 à 2.4 GPa (pour du silicium polycristallin non dopé)
densité	2.32 g/cm ³	2.32 g/cm ³

Le problème mécanique majeur qui apparaît lorsqu'on utilise du silicium polycristallin est la contrainte résiduelle qui peut exister après dépôt. Ces contraintes sont parfois tellement importantes qu'elles peuvent courber le substrat de façon significative, et empêcher certaines étapes technologiques postérieures. Pour réduire ces contraintes, la solution la plus courante consiste à réaliser un recuit thermique.

I.3.4.2. Propriétés électriques

Dans les joints de grain, la jonction de deux orientations cristallines qui se rencontrent provoque la création de liaisons pendantes. Lors du dopage du polysilicium, les atomes dopants s'insèrent majoritairement dans les joints de grain et se fixent à ces liaisons pendantes, rendant les joints de grain électriquement neutres. Ils se comportent alors comme des barrières électriques similaires à des barrières Schottky ou tunnel [8,16,35].

La chute de tension à travers les joints de grains étant faible, on peut considérer le joint de grain comme une résistance linéaire. Ainsi, le polysilicium peut être modélisé par des résistances mises en série (Figure 14)

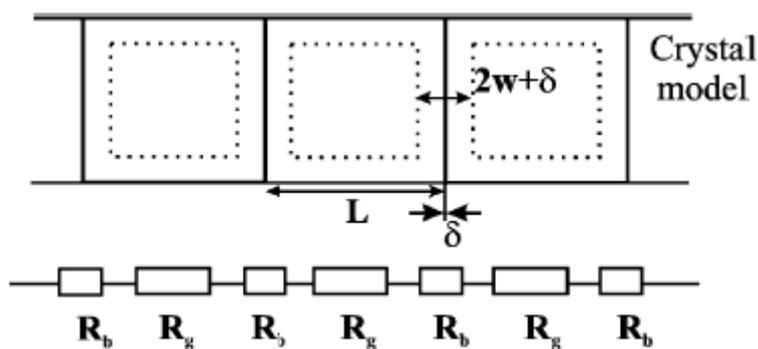


Figure 14 : Modèle électrique du polysilicium [8]

La résistivité du matériau dépend, elle aussi, des conditions de dépôt. Si le polysilicium est déposé à une température supérieure à T_t , il en résulte un nombre de pièges plus important et donc une barrière de potentiel et une épaisseur des joints de grains plus importante. Ainsi, la résistivité des joints de grains étant supérieure à celle des grains, il en résulte une plus grande résistivité du polysilicium (Figure 15).

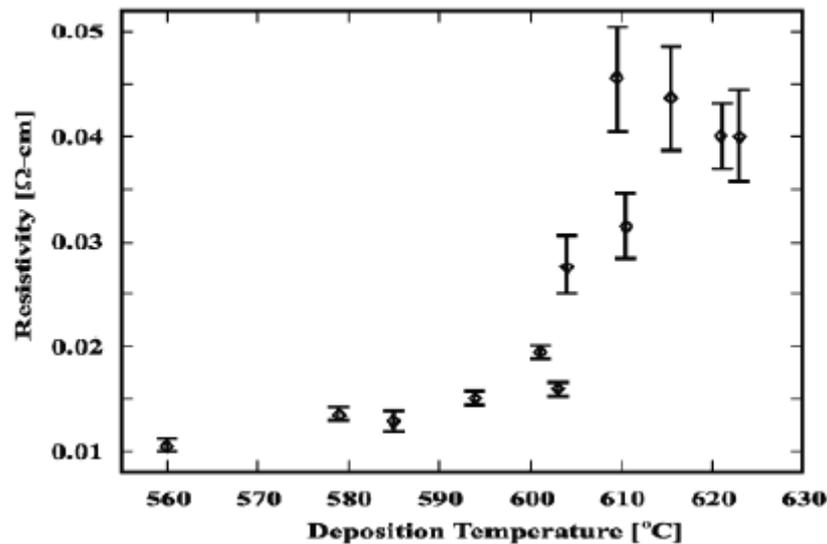


Figure 15 : Résistivité du polysilicium en fonction de la température de dépôt [8]

Les propriétés électriques du polysilicium dépendent fortement de la structure des grains du matériau. Les joints de grains forment une barrière de potentiel aux porteurs de charges mobile affectant la conductivité du matériau. Pour un polysilicium de type p, la résistivité diminue quand le dopage augmente jusqu'à $10^{21} \text{atm/cm}^{-3}$. Au dessus de cette valeur, la résistivité atteint $4 \cdot 10^4 \text{ } \Omega\text{-cm}$ après un recuit de 1000°C . La mobilité maximale pour un polysilicium fortement dopé est $30 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Les joints de grains et la dispersion d'impuretés ionisés sont des facteurs qui limitent la mobilité [10].

▪ La Piézorésistivité du polysilicium

Lorsque la résistivité d'un matériau dépend de la contrainte mécanique qu'on lui applique, on dit que ce matériau est piézorésistif. C'est le cas du silicium monocristallin, pour lequel le facteur de jauge (rapport de la variation relative de résistance sur la contrainte mécanique appliquée) peut atteindre 170 à la température ambiante [10]. Les métaux, en comparaison, ont des facteurs de jauge piézorésistifs bien plus faibles (de l'ordre de 2). Les

jauges piézorésistives des capteurs de pression sont réalisées en silicium polycristallin, qui présente l'avantage de pouvoir être déposé sur n'importe quel type de substrat. Le silicium polycristallin a un facteur de jauge inférieur à celui du silicium monocristallin, mais toujours grandement supérieur à celui des métaux. Ce facteur de jauge varie de 30 à plus de 50 selon la taille des grains, le dopage, et la direction préférentielle des grains. Le fait que l'effet piézorésistif puisse être présent dans les films minces de silicium polycristallin est lié à la structure cristalline des films. Déposé dans des conditions standard, le silicium polycristallin présente une structure colonnaire avec une direction cristallographique préférentielle des grains, ce qui permet un comportement piézorésistif.

II. Principaux moyens technologiques de fabrication des MEMS

Différentes techniques sont utilisées pour la fabrication des MEMS sont principalement :

- Les techniques qui font appel à des processus de dépôt en phase vapeur chimique ou **CVD** (Chemical Vapor Deposition).
- La technique permettant de déposer des couches mince avec des processus de dépôt en phase vapeur physique ou **PVD** (Physical Vapor Deposition).
- La lithographie
- La gravure

II.1. Dépôt en phase vapeur chimique

Le dépôt en phase vapeur chimique (CVD) est une méthode dans laquelle les constituants d'une phase gazeuse réagissent pour former un film solide déposé sur un substrat. Les composés volatils du matériau à déposer sont éventuellement dilués dans un gaz porteur et introduits dans une enceinte où sont placés les substrats. Le film est obtenu par réaction chimique entre la phase vapeur et le substrat chauffé. Dans certains cas, une élévation de température est nécessaire pour maintenir la réaction chimique.

Il existe deux types de réacteurs: celui à paroi chaude et celui à paroi froide. Le réacteur à paroi chaude est chauffé directement, ce qui permet d'opérer à plus faible pression: à peu près 10^{-4} atm [18], pour lesquels des dépôts se produisent bien sur les substrats, mais aussi sur les parois (technique LPCVD pour dépôt de couches minces en phase vapeur chimique à basse pression). Dans le cas du réacteur à paroi froide, seul le substrat est chauffé, si bien que la réaction n'est effective qu'au niveau du substrat chauffé; elle se produit à pression atmosphérique. Avec la méthode CVD, il est possible de déposer des matériaux métalliques, diélectriques et composites.

La figure 16 représente les principales étapes de la CVD [19].

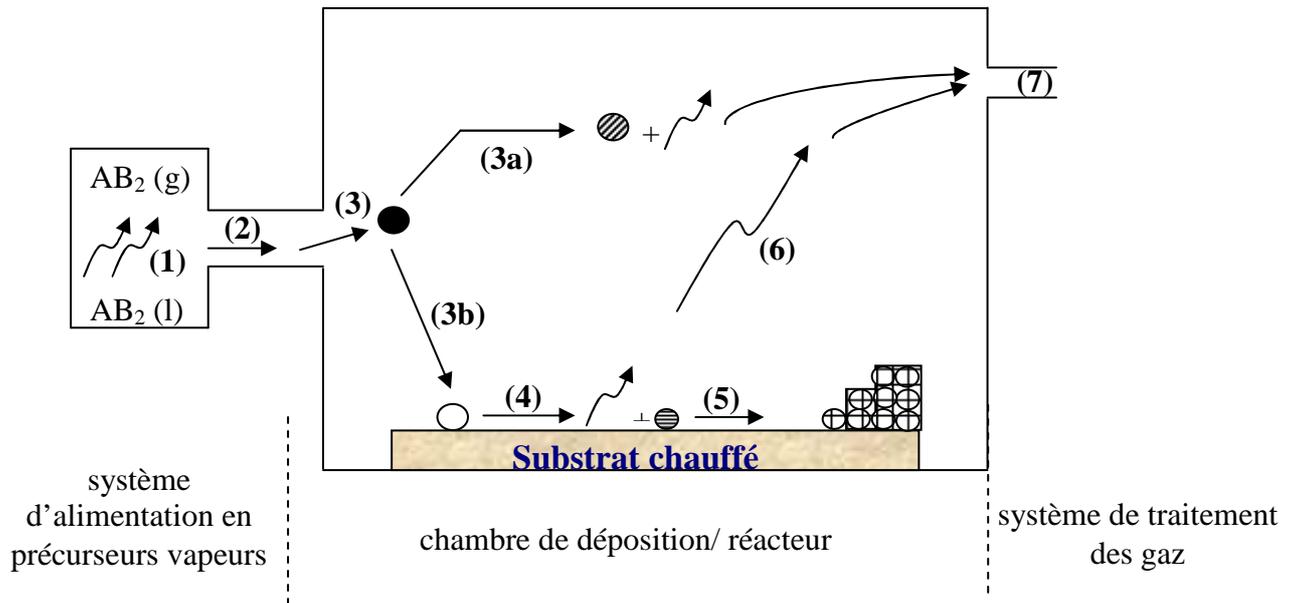


Figure16 : Schéma illustratif des étapes de la CVD

(1) : génération des réactants gazeux.

(2) : transport des espèces gazeuses dans la chambre de réaction.

(3) : réactions chimiques dans la phase gazeuse qui font apparaître de nouvelles espèces de réactifs intermédiaires ;

(3a) : à des températures au dessus de la température de décomposition des espèces intermédiaires, une réaction en phase gazeuse homogène peut avoir lieu où ces espèces vont subir des décompositions successives et/ou des réactions chimiques, formant ainsi des poudres et d'autres produits volatiles. La poudre sera collectée sur la surface du substrat, et les produits résiduels sont évacués vers l'extérieur.

(3b) : à des température en dessous de la température de dissociation des espèces intermédiaires, une diffusion /convection de ces espèces a lieu sur la surface du substrat.

(4) : absorption des réactants gazeux sur le substrat chauffé ; la réaction hétérogène a lieu à l'interface gaz- solide, ce qui produit les espèces constitutifs du film à déposer et d'autres produits résiduels sous forme de gaz.

(5) : diffusion des espèces adsorbés le long du substrat chauffé, formant ainsi des centres de cristallisation et de croissance du film.

(6) : les gaz issus des réactions sont transportés par diffusion ou convection.

(7) : les précurseurs gazeux non réactifs et les gaz résultant des réactions sont transportés de la chambre de déposition vers l'extérieur.

Aux basses températures, la vitesse de dépôt est déterminée par le taux avec lequel les molécules réagissent à la surface. Pour cela la vitesse de dépôt augmente rapidement avec la température.

Quand la température augmente, on atteint un palier dans lequel la vitesse de dépôt n'est déterminée que par le taux de diffusion des molécules à la surface. C'est le régime de contrôle par diffusion. Finalement, on arrive à un point où la température du substrat est très élevée ce qui induit la dégradation de la couche déposée.

La pression des gaz influe aussi énormément sur le dépôt : la diffusivité des gaz augmente fortement lorsque la pression diminue : le dépôt résultant est alors de meilleure qualité.

II.1.1. Le dépôt CVD assisté par plasma (PECVD)

L'idée de base de cette technique est de remplacer l'activation par chauffage de la réaction chimique, par une activation sous plasma. Cela a l'avantage de réaliser des films à basse température.

Les plasmas sont des gaz partiellement ionisés composés d'électrons, de particules ioniques chargées, d'atomes neutres et de molécules. L'ensemble est électriquement neutre. Un plasma peut être généré en soumettant un gaz à un champ électrique alternatif. Les électrons libres sont alors accélérés et acquièrent de l'énergie provoquant l'ionisation des molécules de gaz. L'apparition d'espèces ionisées et excitées initié un grand nombre de phénomènes réactionnels complexes (ionisation, dissociations, émission, recombinaison...) [20] permettant l'observation d'un phénomène de décharge luminescente.

a. Principe de dépôt par plasma

Lorsque le substrat est en contact avec un plasma froid contenant une ou plusieurs espèces condensables, un film se forme à sa surface. Par l'intermédiaire de réactions entre les espèces présentes dans le plasma et à la surface les molécules de la phase gazeuse forment un film qui recouvre le substrat

Plusieurs phénomènes interviennent dans la formation des dépôts. Ils mettent en jeu les phénomènes suivants :

- Adsorption à la surface par physisorption

- Création de sites radicalaires en surface (par mécanisme ionique)
- Mobilité des espèces en surface (fonction de la température)
- Dépôt par chimisorption de radicaux sur les sites radicalaires
- Passivation des radicaux par les atomes H
- Réticulation par liaisons entre deux radicaux

La figure 17 représente les différents processus du dépôt par plasma

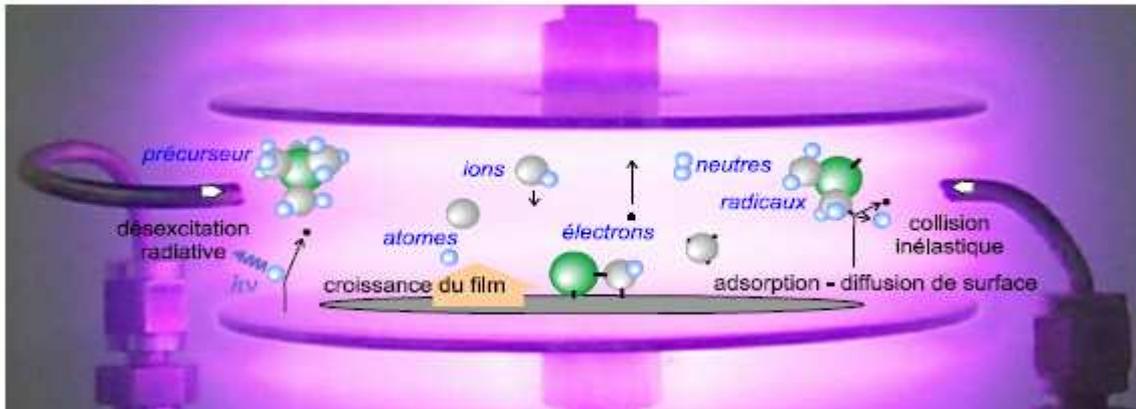


Figure 17 : Différentes réactions du plasma [20]

Le plasma de dépôt est généré dans une enceinte sous vide en appliquant un champ électrique variable à un mélange gazeux contenant une ou plusieurs espèces condensables. Le Substrat est mis en contact avec le plasma. Plusieurs paramètres peuvent être ajustés : le volume et la forme de l'enceinte, la puissance du champ électrique, sa fréquence, la nature et la quantité du précurseur injecté, la pression dans l'enceinte, la nature du substrat, sa température et sa position par rapport au plasma. Les propriétés du film formé par plasma dépendent du précurseur choisi et surtout des conditions dans lesquelles le plasma est généré.

II.2. Dépôt en phase vapeur physique

II.2.1. Pulvérisation cathodique

La déposition par pulvérisation cathodique consiste en un bombardement, dans une chambre à vide, par un flux d'ions inerts (Argon, Helium) d'une cible constituée du matériau à déposer. Les particules éjectées du matériau sont alors déposées sur le substrat. Cette méthode est souvent utilisée pour la fabrication de microsystemes, car elle permet des dépôts à basse température (<150°C) de films métalliques fins comme l'aluminium, le titane, le chrome ou encore des oxydes de silicium voire des matériaux piézo-électriques.

Le système le plus simple de pulvérisation cathodique est décrit par le schéma de la figure 18. Il consiste en une enceinte métallique ou en verre sous vide dans laquelle sont disposées deux électrodes (anode et cathode) plates et refroidies à l'eau. L'enceinte est équipée d'une fenêtre à travers laquelle on peut observer la décharge.

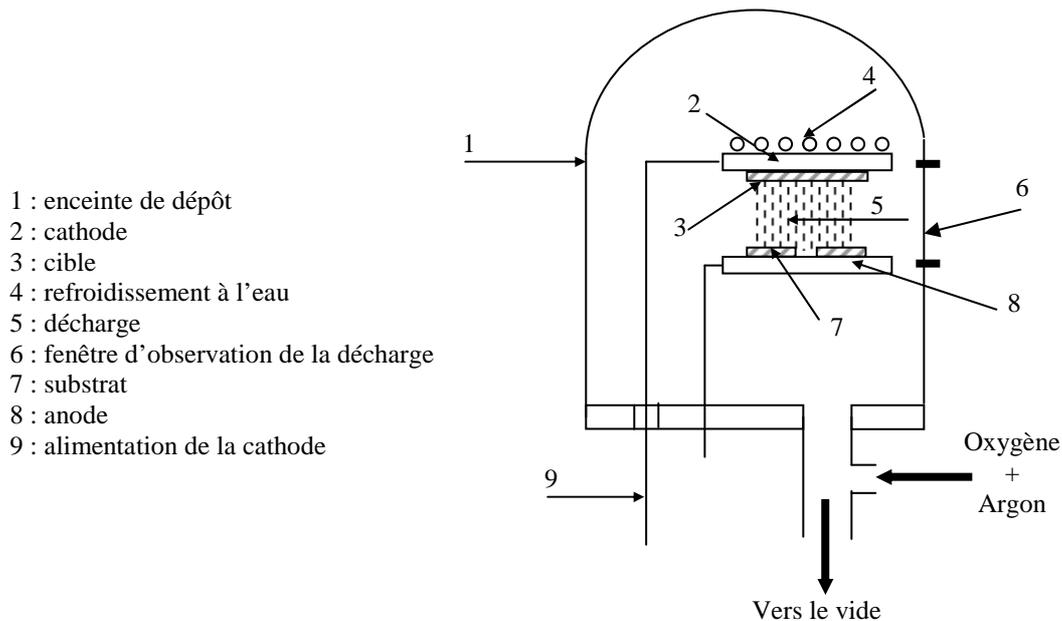


Figure 18 : Représentation schématique du système de pulvérisation cathodique

II.3. Lithographie

La lithographie consiste en un procédé photographique, permettant d'imprimer des images sur des couches de matériaux photosensibles. Ces dessins sont généralement utilisés par la suite comme masque de protection, lors d'une étape de gravure ou comme élément sacrificiel, dans une étape de lift-off [21].

La lithographie implique la séquence des trois étapes suivantes

- Application d'une résine photosensible,
- Exposition optique pour imprimer l'image du masque sur la résine,
- Immersion du substrat dans une solution aqueuse de développement, pour dissoudre la résine exposée, et rendre ainsi visible l'image latente.

La figure 19 représente les étapes de la photolithographie.

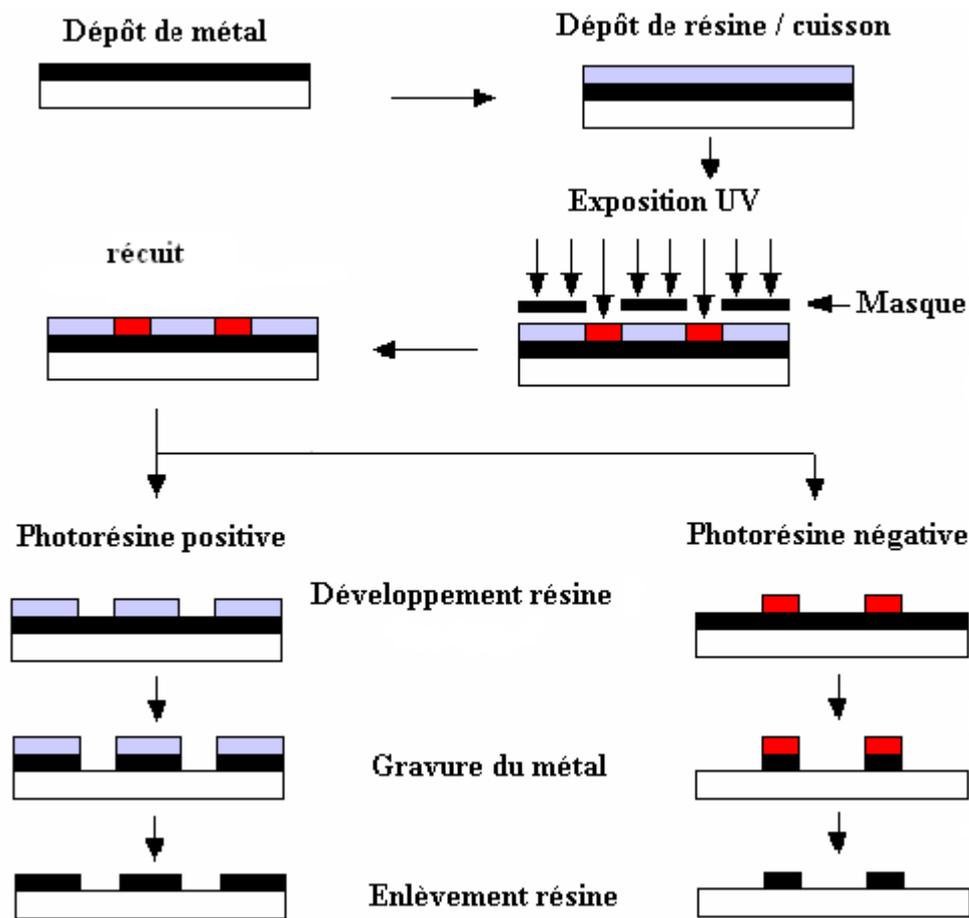


Figure 19 : Les étapes du procédé photolithographie.

II.3.1. Dépôt de la résine

Lors de la première étape, l'étape de dépôt, le substrat est d'abord revêtu d'une mince couche de résine adaptée à la méthode de lithographie choisie [21]. Pour la lithographie optique (par transmission), elle doit être sensible à une radiation précise : ultraviolets (UV), rayons X. Dans le cas des résines organiques (polymères), une tournette permet d'étaler uniformément la résine (enduction) tout en maintenant la plaquette en place par un système d'aspiration (figure 20). La vitesse de rotation, l'accélération et le temps sont réglés pour obtenir une couche fine et d'épaisseur constante sur toute la surface. Il existe aussi des résines inorganiques. Afin de déposer ce type de résine sur le substrat, les techniques de dépôts conventionnelles sont utilisées : dépôt par évaporation, pulvérisation, ablation laser. . .

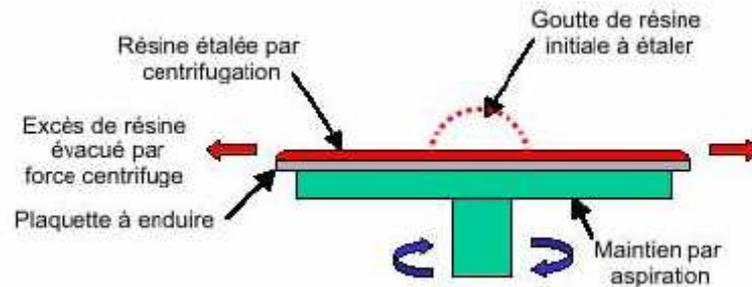


Figure 20 : La résine organique est étalée par centrifugation (*spin-coating*).

II.3.2. Reproduction du motif dans la résine

La seconde étape, clé de la lithographie, consiste à dupliquer le motif dans la couche de résine en la modifiant chimiquement ou physiquement.

Simultanément au fait de reproduire le motif, il est parfois impératif de contrôler sa position sur le substrat par :

- une étape d’alignement sur les niveaux de lithographies antérieures. L’alignement doit être rapide et précis (avec, si possible, une précision équivalente à la résolution de la technique).

En effet, la réalisation d’un dispositif nécessite souvent plusieurs étapes de lithographie.

Ces niveaux successifs doivent être correctement superposés, alignés les uns par rapport aux autres.

- un procédé de raccord de champs (exposition de champs adjacents). Suivant la technique utilisée, la lithographie d’une grande surface s’effectue en juxtaposant plusieurs champs (de surface plus petites), larges de quelques dizaines de micromètres. Ces derniers doivent être alignés les uns par rapport aux autres, de telle sorte qu’une ligne qui traverse toute la surface ne soit pas interrompue.

II.3.3. Le développement

Les régions de la résine dans lesquelles le motif a été enregistré ont subi des transformations chimiques ou physiques. Le but du développement est de révéler sélectivement ces zones modifiées dans l’épaisseur de la couche afin de former une structure de résine en 3 dimensions. Ceci peut s’effectuer par voie humide (immersion dans un solvant adéquat ou pulvérisation de ce dernier) ou par voie sèche (plasma adapté).

Dans le cas des résines organiques, l’exposition engendre des réactions chimiques (scission de longues chaînes de polymère en petits fragments) permettant de rendre soluble ou insoluble

les régions exposées dans un certain solvant ou agent de développement. Lorsque les régions exposées deviennent solubles, on parle de résine positive (cf. figure 19). À l'opposé, lorsque les régions exposées deviennent insolubles, on parle de résine négative. Ce principe général du développement, consistant à isoler de manière sélective les parties sensibilisées ou non par le procédé lithographique, s'étend aussi bien à d'autres types de résines qu'à d'autres techniques lithographiques.

Pour renforcer la résistance de la résine aux attaquants chimiques et pour améliorer l'adhérence sur le substrat, le développement est suivi d'un recuit à 130°C.

II.3.4. Le transfert du motif

A l'issue du développement, certaines zones du substrat sont protégées par la résine tandis que d'autres ne le sont plus. La résine forme ainsi un masque qui va permettre de reproduire, de transférer le motif soit dans le substrat, soit dans un autre matériau afin de former la structure voulue. C'est l'étape de transfert. Tout aussi cruciale que l'étape de lithographie, elle exige de reproduire avec fidélité les motifs de résine : conservation de leur taille et de leur forme initiales.

Cette étape utilise des procédés de microfabrication tels que le dopage (implantation ionique, . . .), l'oxydation, le dépôt de couches minces (pour lift-off, par exemple) et la gravure.

Le procédé de lift-off, est considéré comme la meilleure méthode de transfert de motifs pour accéder à une très haute résolution et à un facteur de forme raisonnable. Il consiste à déposer sur l'échantillon une couche mince métallique par évaporation sous vide (méthode de dépôt directionnelle) dans des conditions tolérables pour la résine. La couche de matériau se dépose tant sur la résine restant après le développement que sur la surface du substrat (ouverture dans la résine). Par contre, à l'issue de la dissolution de la résine dans un solvant approprié, seul les parties métalliques directement en contact avec le substrat subsistent et forment les structures : obtention d'un négatif du masque de résine métallique, pouvant être utilisé comme masque de gravure.

II.4. Principe et méthode de gravure

La gravure est une méthode de transfert soustractive, c'est à dire que la structure est formée par un enlèvement de matière du substrat ou d'une couche sous-jacente via les ouvertures d'un masque de résine PMMA. Cette attaque chimique et/ou physique des parties de la surface non protégées par le masque peut être réalisée en milieu liquide (gravure

humide) ou en milieu gazeux (gravure sèche par plasma ou faisceau d'ions). L'objectif et le résultat de cette gravure sont définis à l'aide de différents critères.

II.4.1. La gravure humide :

La gravure par voie humide se fait par attaque chimique en solution aqueuse (bain contenant de l'eau). Suivant les concentrations de l'espèce réactante, on étalonne les vitesses de gravure pour un type de couche. En général, par voie humide, la couche est attaquée de façon équivalente suivant toutes les directions de l'espace. On dit que la gravure est isotropique.

Dans de très nombreuses filières technologiques, la gravure humide est utilisée majoritairement car elle est relativement simple à mettre en oeuvre et que dans des grands bacs, un lot complet pouvant contenir jusqu'à 200 plaquettes peut être traité en une seule opération (figure 21).

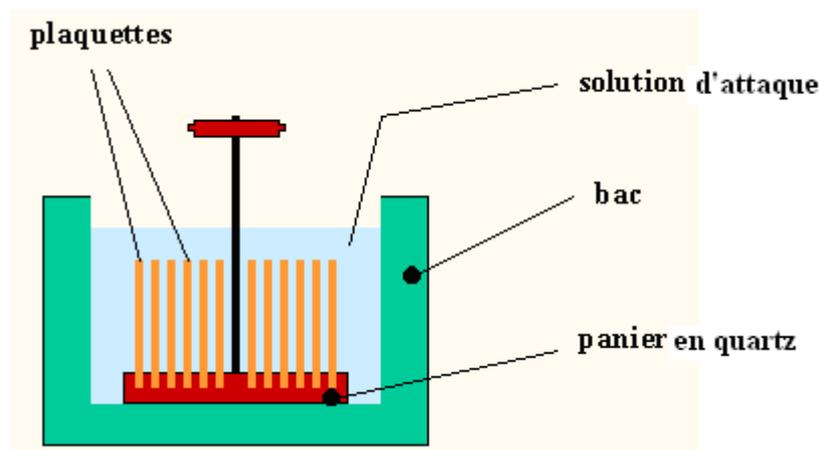


Figure 21 : Gravure d'un panier de plaquette par voie humide

Cela constitue un gain de temps considérable. Par contre, il faut après traitement chimique rincer abondamment et sécher les plaquettes. Le rinçage se fait aussi dans des bacs. Durant le rinçage à l'eau déionisée, la résistivité de l'eau est contrôlée afin de déterminer la quantité d'ions contaminants encore désorbés par les plaquettes. Lorsque la résistivité devient supérieure à 16 M Ω .cm, on s'approche de la résistivité de l'eau ultra pure (18 M Ω .cm) et on peut arrêter le rinçage. Le séchage s'effectue dans de très grandes centrifugeuses ou par soufflette d'azote ou d'air sec.

La gravure humide présente aussi d'autres inconvénients, à savoir :

- la gravure est isotropique (toutes les directions de l'espace) ce qui crée des attaques latérales notamment dans les zones protégées par la résine,
- la vitesse de gravure dépend de la concentration et du type d'impureté que contient le film à graver. Cette vitesse de gravure dépend de la quantité des substrats traités, l'efficacité d'attaque diminuant après plusieurs lots,
- le point de fin de gravure est difficilement contrôlé. Cela peut entraîner une surgravure latérale ou verticale dans le cas d'une faible sélectivité.

La solution la plus couramment utilisée pour le silicium polycristallin est l'acide fluorhydrique HF.

II.4.2. Gravure plasma

Il s'agit d'une gravure physico-chimique, car elle met en jeu à la fois un bombardement ionique, énergie mécanique, et une réaction chimique entre le gaz ionisé et les surfaces de l'échantillon. Les atomes du gaz réagissent avec les atomes de l'échantillon pour former une nouvelle espèce volatile qui sera évacuée par le groupe de pompage. On parle de gravure ionique réactive (ou Reactive Ionic Etching) ou encore de gravure sèche car elle se déroule au sein d'un plasma, par opposition à la gravure humide de matériau. Le réglage des différents paramètres (pression, puissance, température, polarisation) permet de donner plus ou moins d'importance à l'un ou l'autre des processus de gravure. En effet, une faible polarisation, une pression et une température élevée vont favoriser le processus chimique. Par contre, une tension de polarisation importante et une pression basse vont favoriser le bombardement mécanique. On peut également obtenir des gravures isotropes et anisotropes : les réactions chimiques entre le gaz et l'échantillon produisent une gravure sélective et isotrope alors que l'érosion de la surface dû au bombardement ionique est anisotrope et non sélectif (des flans quasi droits peuvent être obtenus en privilégiant la gravure mécanique due aux chocs des ions avec le matériau). Par le choix des gaz réactifs, fluorés ou chlorés, une large gamme de matériaux peut être gravés. La figure 22 donne le schéma d'un réacteur de gravure plasma à platine.

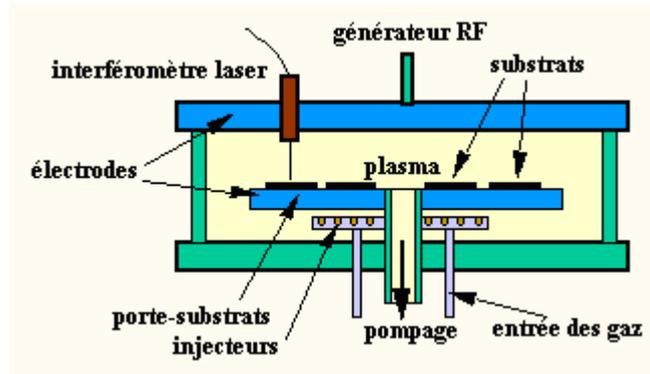


Figure 22 : Réacteur de gravure plasma à platine porte-substrats horizontale

II.5. Implantation ionique

L'implantation ionique est essentiellement utilisée pour doper le semi-conducteur durant la fabrication des dispositifs [8,10]. Elle consiste à introduire des atomes ionisés pour jouer le rôle de projectiles avec suffisamment d'énergie et pour pénétrer dans des régions de surface de la plaquette.

Le bore (B), le phosphore (p), l'arsenic (As), l'Indium (In) sont les atomes dopants les plus couramment employés. Les énergies des atomes ionisés se situent dans la gamme de 1 à 500 keV. En fonction de la nature du matériau implanté, de la nature de l'ion accéléré et de l'énergie d'accélération, la profondeur moyenne de pénétration peut aller de 100\AA à $1\mu\text{m}$. Cette technique permet un contrôle précis de la quantité totale d'atomes implantés (dose d'implantation) et du profil de concentration du dopant.

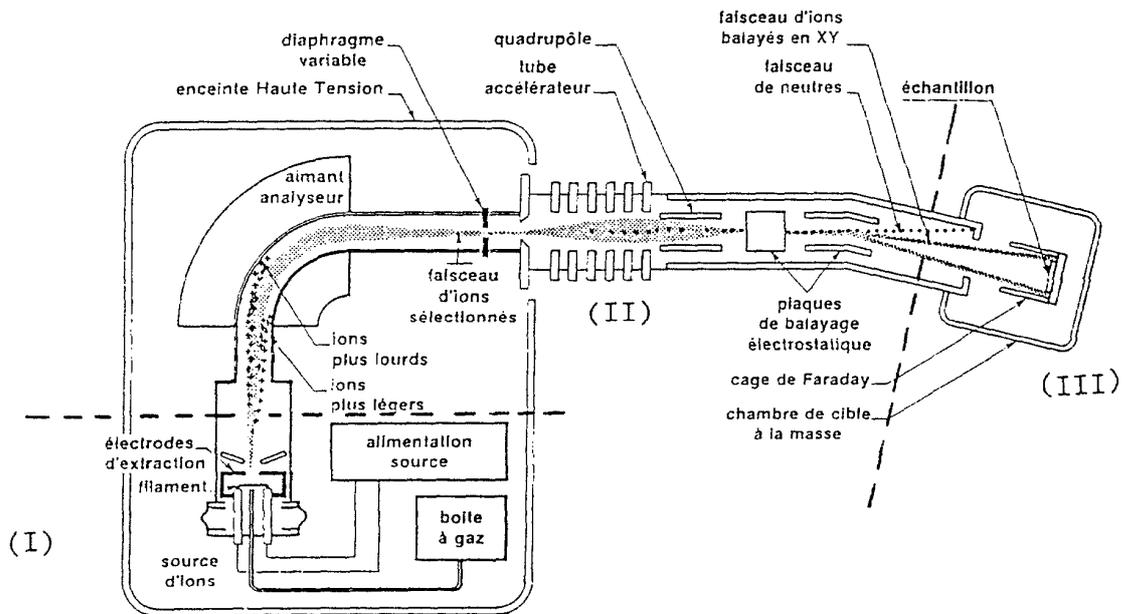
Cet implanteur (figure 23) est un accélérateur d'ions. Une chambre d'ionisation permet de générer les ions à partir d'une source gazeuse (ou solide, ou liquide). Un accélérateur donne aux ions l'énergie d'implantation souhaitée. Des lentilles électrostatiques mettent en forme le faisceau d'ions.

Un dispositif de balayage en x et y permet d'implanter de façon uniforme les plaquettes. La déviation du faisceau permet d'éliminer les ions neutralisés sur le parcours et qui ne pourraient être dénombrés. Les ions vont ensuite pénétrer dans la plaquette située dans la chambre d'implantation.

Les paramètres de l'implantation que nous devons fixer, sont :

- E : l'énergie d'implantation. Ainsi on peut définir la profondeur de pénétration des ions implantés.

- D : la dose implantée. Elle permet de choisir le niveau de dopage que l'ion souhaite obtenir. La dose se mesure en nombre d'atomes par unité de surface $[D]=\text{at}/\text{cm}^2$. Elle se mesure au travers du flux d'ions atteignant la surface de l'échantillon, qui correspond à un courant.



- I - Source d'ions
- II - Tri, accélération et balayage des ions
- III - Chambre cible

Figure 23 : Schéma simplifié d'un implantateur ionique

III. Les techniques de caractérisations utilisées pour les MEMS

Les techniques de caractérisations utilisées pour les MEMS sont principalement la microscopie optique et microscopie électronique à balayage (MEB) et AFM pour analyser la morphologie de la surface de notre structure.

En plus le champ d'application de l'AFM s'est étendu à l'étude des contacts, des frottements, de l'usure ou encore de l'adhésion entre surfaces à l'échelle nanométrique.

III.1. La microscopie électronique à balayage MEB

La microscopie électronique à balayage est une technique d'analyse qui permet de visualiser la morphologie de la surface des couches minces et de déterminer la taille des grains et des agrégats.

Le microscope électronique à balayage est constitué de :

-un canon à électrons qui comprend un système anode-cathode d'émission et d'accélération des électrons incidents ainsi que des lentilles objectives de focalisation.

- un système de balayage du faisceau.

- un porte-objet.

- un scintillateur permettant de détecter les électrons secondaires.

a. Principe de la microscopie électronique à balayage :

Le principe de ce microscope est basé sur le balayage de la surface de l'échantillon par un faisceau d'électrons très fin suivi de la détection des électrons secondaires émis par l'échantillon. Cet effet est transformé en un signal électrique qui permet l'obtention de l'image de la surface.

La figure 24 présente les différentes particules qui résultent de l'impact d'un faisceau électrique sur une surface solide.

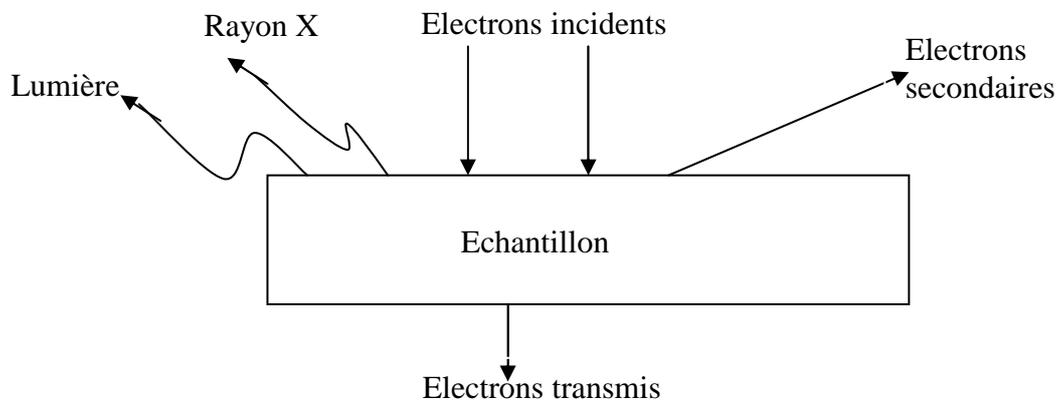


Figure 24: Différentes particules qui résultent de l'impact d'un faisceau électrique sur une surface solide.

Les électrons secondaires (vrais) résultent de l'ionisation des atomes de la cible (échantillon). Ces électrons sont caractérisés par une énergie très faible ($E < 50 \text{ KeV}$). Donc seuls les électrons émis au voisinage de la surface sont détectés.

Les dimensions de la zone à analyser sont du même ordre que celles du faisceau incident.

La synchronisation entre le balayage de la surface par le faisceau des électrons incidents et la détection des électrons secondaires permet de transmettre l'image de l'échantillon point par point et ligne par ligne. Cette image devient complète après une période de balayage entière.

III. 2. La microscopie à force atomique (AFM)

III.2.1. principe général

La microscopie à force atomique, inventée en 1986 par Binnig et al., est basée sur l'interaction entre une pointe-sonde et la surface d'un échantillon. Son principe consiste à mesurer les différentes forces d'interaction entre une pointe idéalement atomique, fixée à l'extrémité d'un bras de levier, et les atomes de la surface d'un matériau. Le principe (figure 25) consiste donc à mener, soit au contact de la surface à étudier, soit à une distance de quelques angströms, une pointe dont l'extrémité a un rayon de quelques nanomètres. Cette pointe généralement en nitrure de silicium (Si_3N_4) [22,23], se situe à l'extrémité d'un

microlevier flexible. La déflexion du microlevier, induite par les forces d'interaction entre la pointe et l'échantillon, peut être mesurée grâce à un système optique.

En mode imagerie, un système de déplacement piézoélectrique permet de mouvoir la pointe finement par rapport à l'échantillon dans les trois dimensions de l'espace : x, y (plan de la surface) et z perpendiculaire à la surface.

Le système de détection est alors utilisé :

- pour reconstruire la cartographie du potentiel d'interaction pointe surface,
- pour contrôler le maintien de la force d'interaction constante dans le mode force constante de l'AFM

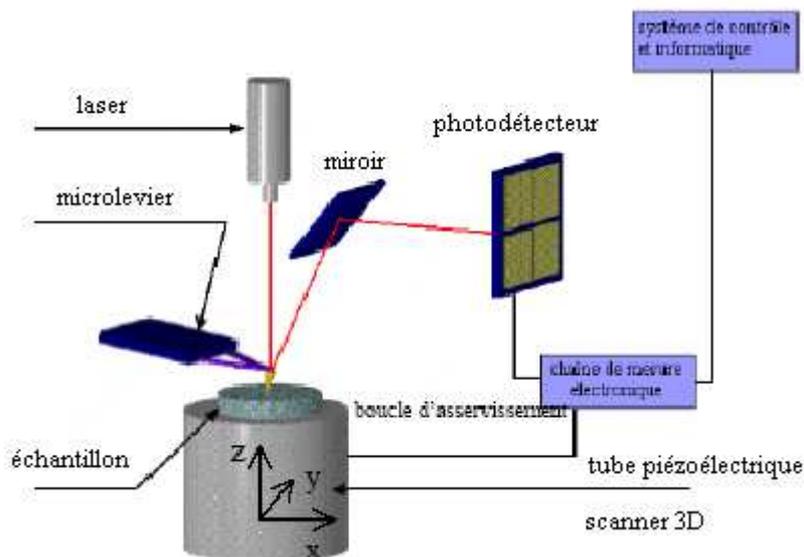


Figure 25 : Schéma de principe d'un microscope à force atomique [22]

III.2.2. la détection

Le mode de détection optique est le plus couramment utilisé car il est simple d'utilisation et permet d'obtenir des images dans différents milieux. Son principe de fonctionnement repose sur la réflexion d'un faisceau laser par le microlevier vers une photodiode à quatre segments.

Cette détection optique présente la particularité de ne détecter que les variations angulaires et non pas les variations de hauteurs. En effet, la réflexion sur le microlevier ne dépend que de l'orientation de la normale à sa surface.

Chapitre II

Défauts de microsystemes et Fiabilité

I. Fiabilité des microsystèmes

La fiabilité peut être définie comme la probabilité qu'un objet puisse exécuter sa fonction propre pendant un temps spécifié dans des conditions de fonctionnement définies

L'enjeu de la fiabilité des microsystèmes est de comprendre les mécanismes d'endommagement afin d'optimiser la conception, la fabrication et de définir les critères de fiabilité.

Beaucoup de dispositifs microsystèmes sont composés de métaux ou de matériaux qui peuvent subir de larges déformations. La connaissance du comportement de ces matériaux à de telles échelles est donc essentielle aussi bien lors de la fabrication des MEMS que pour l'estimation de leur performance et de leur fiabilité à long terme [23-27].

I.1. Approches de la fiabilité des microsystèmes

L'étude de la fiabilité des microsystèmes peut être scindé en deux parties : celle qui s'intéresse à un procédé de fabrication et celle qui traite du système complet [12,27].

I.1.1. Fiabilité d'un procédé technologique :

La mise en place d'un procédé de fabrication est la première étape du développement d'un nouveau produit. L'étude de la fiabilité intrinsèque de ce procédé est indispensable afin d'identifier et d'éradiquer ses éventuelles faiblesses pour atteindre un niveau de performance satisfaisant.

L'analyse de la fiabilité d'un procédé technologique s'appuie sur une série de tests destinés à caractériser les paramètres géométriques et mécaniques des briques élémentaires d'une technologie. En fonction de cette caractérisation, le rendement de la fabrication pourra être déterminé. Les tests des microsystèmes permettent de déterminer des zones défailtantes à la fin d'un procédé de fabrication. Dans le cas des microsystèmes, il s'agira de caractériser les procédés technologiques en mesurant les paramètres technologiques des matériaux comme le module de Young, le stress interne dans les couches, les conductivités thermiques.

I.1.2. Fiabilité d'un système complet :

Une fois que la technologie de fabrication est caractérisée et fiabilisée, il est nécessaire d'étudier la fiabilité propre du microsystème, c'est à dire celle qui est liée directement à son utilisation et à son domaine environnemental d'utilisation. Cette étude se fait par :

- Evaluation d'un nombre important d'échantillons sous différentes conditions de fonctionnement afin d'obtenir des résultats statistiques.
- créer des modèles de fiabilité prédictifs pour permettre la quantification de la fiabilité sous différentes conditions.
- la réalisation de tests de vieillissement à grande échelle pour valider la fiabilité du produit.

II. Mécanismes de défaillances des microsystemes

II. 1. Défauts technologiques de la structure

Les étapes utilisées pour la fabrication des microsystemes et des circuits intégrés sont sensiblement les mêmes. Elles se composent d'un ensemble de couches de semi-conducteurs, conducteurs et diélectriques obtenues grâce à des opérations technologiques qui comprennent des étapes d'oxydation, de dépôt, de photolithographie, d'attaque chimique, d'implantation ionique et de recuit [12,23,,27]. A ces étapes, s'ajoute une étape de gravure supplémentaire pour permettre la libération des structures suspendues. A chaque étape technologique, un certain nombre de problèmes peuvent être rencontrés. Chacun de ces problèmes pouvant alors donner naissance à un défaut de la structure finale.

Les défauts induits sont :

➤ **Lors de la phase d'oxydation :**

- Des molécules d'hydrogènes peuvent créer des hydroxydes à l'origine de microruptures de l'oxyde.
- Une modification de température ou de durée d'oxydation peut causer une variation au niveau de l'épaisseur d'oxyde.

➤ **Lors des phases de dépôt :**

- Des vides peuvent apparaître dans les réseaux cristallins de tous les types de couches déposées qui peuvent causer des circuits ouverts dans les conducteurs.
- Une modification de température ou de durée de dépôt peut affecter l'épaisseur de la couche déposée.
- La présence de microfissures et d'impuretés peut être à l'origine d'une augmentation de résistance et de résistivité dans les métaux.

➤ **Lors des phases de lithographie :**

- Des résidus de résine photosensible ou des particules contaminantes (poussière) sur le masque peuvent causer des circuits ouverts ou des courts-circuits.
- La présence d’ombres dues à la réflexion d’une lumière parasite ou une mauvaise répartition de la résine peut conduire à des dimensions de masques plus faibles qui se traduisent par des conducteurs plus larges et plus résistifs.
- Un mauvais alignement de masque peut entraîner une fracture dans la structure.

➤ **Lors des phases de gravure :**

- Une surgravure peut entraîner des ruptures de parties suspendues d’une structure
 - Un temps de gravure trop court peut conduire à des circuits ouverts au niveau des couches conductrices ou à des contacts non désirés à l’origine de circuit ouvert.
- Les étapes de gravure affectent aussi la qualité des contacts.

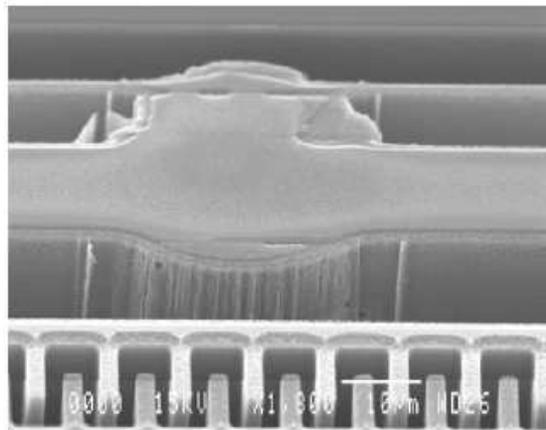


Figure 26 : Collage entre les deux bras de ressort d’un accéléromètre dû à un problème de gravure de la couche de silicium [27].

➤ **Lors des phases d’implantation d’ions :**

Des variations au niveau de la densité des atomes dopants peuvent affecter les propriétés des matériaux comme la résistivité, les coefficients thermiques, les coefficients Seebeck, la piézorésistivité et la conductivité thermique.

➤ **Lors des phases de recuits :**

- L'utilisation de températures importantes combinée à des coefficients d'expansion thermique différents peut mener à des ruptures des couches isolantes ce qui se traduit par des courts-circuits ou à des ruptures de microstructures.
- La température de recuit affecte l'ensemble des propriétés mécaniques du polysilicium.

➤ **Durant la phase de libération :**

- Une gravure non maîtrisée (durée, vitesse) peut être à l'origine de modifications géométriques de la structure ou de la cavité fabriquée. De plus, la présence de résidus non gravés dans la cavité (figure 27) peut causer des problèmes dans le cas de certaines applications comme les capteurs thermiques ou les accéléromètres à cause des fuites thermiques ou des diminutions du facteur d'amortissement.
- Une différence de coefficients d'expansion thermique des couches composant une structure peut être à l'origine de contraintes intrinsèques résiduelles mis en évidence par la présence de courbures ou de flambages. Ces contraintes peuvent causer par la suite, des modifications de notre structure.
- Le fait de retirer les puces du liquide de gravure attire souvent les structures suspendues vers le substrat où elles restent collées à cause des forces capillaires. Une fois en contact et même après que la puce ait été séchée, les parties suspendues restent collées à cause des différentes forces d'adhésion mises en jeu (figure 28).

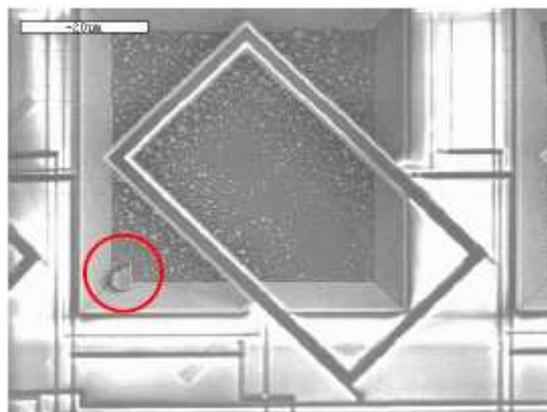


Figure 27 : Présence de résidus dans la cavité [12]

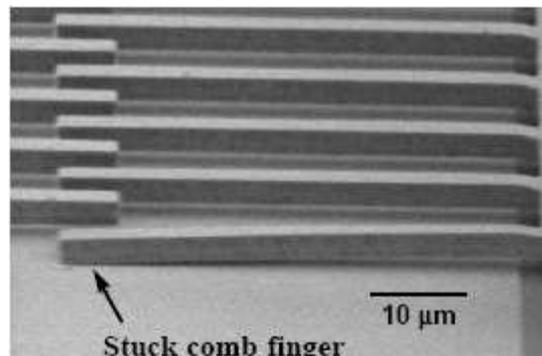


Figure 28 : Collage du cantilever au substrat [23]

II.2. Mécanismes de défaillances induits par le fonctionnement

II.2.1. Le collage

Le collage est sans aucun doute le mécanisme de défaillance le plus répandu pour les microsystèmes usinés en surface. Il tend à coller des structures microscopiques entre elles ou au substrat après que leurs surfaces aient été mises en contact de manière intentionnelle ou non.

Compte tenu de la réduction du rapport surface sur volume dans le domaine micronique, les forces de surface jouent un rôle prédominant à l'origine du phénomène de collage. Parmi ces forces, nous pouvons citer les forces capillaires (de loin les plus importantes), les forces de Van Der Waals et les forces électrostatiques.

Il est possible de se prémunir contre ce mécanisme de défaillance lors de la conception d'un dispositif : réalisation de structures plus raides, réduction des surfaces de contact, ajout d'amortisseurs.

II.2.2. Fatigue mécanique

La fiabilité mécanique des matériaux a été étudiée grâce à des tests de vieillissement ou des tests de cyclages selon l'application considérée. La plupart des résultats mettent en évidence une diminution de la résistance du polysilicium en fonction du nombre de cycles réalisés.

Cette diminution de résistance du polysilicium peut être une limitation non négligeable de la fiabilité et de la durée de vie des composants microsystèmes en silicium polycristallin. Même si la structure en polysilicium n'est pas totalement défaillante, la perte de raideur peut

causer des erreurs non tolérables pour des composants basés sur une raideur constante pour des mesures inertielles ou temporelles (oscillateur ou gyroscope). De plus, les structures en polysilicium sont sensibles à la fracture notamment en présence de microfissures (Figure 29) qui peuvent être générées en présence de vapeur d'eau ou de particules libres en mouvement à la surface de l'échantillon.

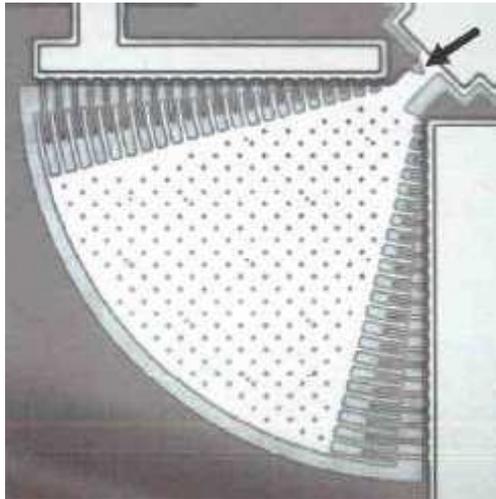


Figure 29 : Fracture induite par une microfissure [17]

II.2.3. Usure

Ce phénomène prend naissance lors du frottement d'une surface sur une autre (Figure 30). Il résulte donc d'une action purement mécanique. Il existe quatre principaux mécanismes d'usure : l'adhésion, l'abrasion, la fatigue et la corrosion.

L'adhésion est causée par une surface qui vient arracher par frottement des fragments d'une autre surface. Ce phénomène est dû principalement à la rupture des liaisons qui lient deux surfaces.

L'abrasion apparaît lorsqu'une surface dure et rugueuse glisse sur une surface plus molle et lui arrache des fragments de matériau. Ce mécanisme, beaucoup moins important que l'adhésion, prend surtout naissance en présence de particules positionnées sous des microstructures.

La corrosion est le résultat d'une interaction chimique entre deux surfaces. Le frottement vient ensuite arracher un des produits de la réaction. Ce type d'usure peut être important pour les microsystèmes actifs chimiquement (microfluidiques ou biologiques).

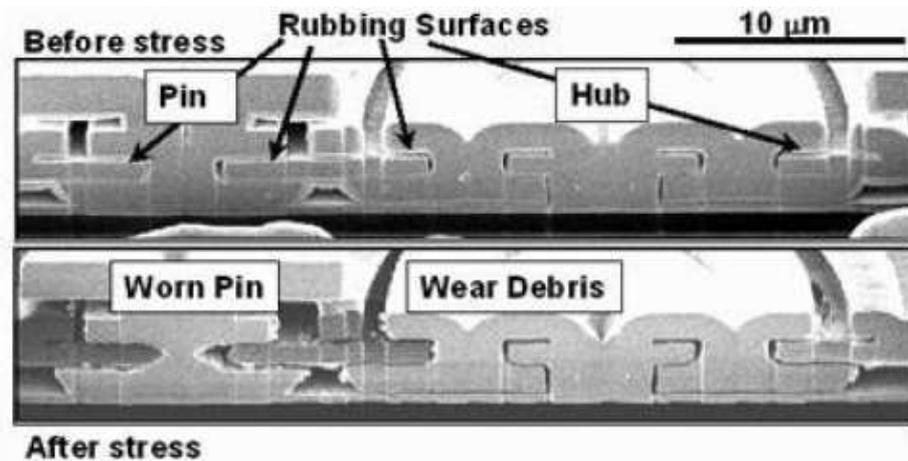


Figure 30 : Effets de l'usure sur un micromoteur (vue en coupe) [12]

II.2.4. Fluage

A des températures élevées, un matériau soumis à une contrainte inférieure ou supérieure à sa limite d'élasticité, présente une déformation plastique évoluant dans le temps et pouvant conduire éventuellement à la rupture. Ce phénomène appelé fluage, peut donc être à l'origine de la diminution de la durée de vie des métaux à température de fusion faible utilisés dans les technologies microélectroniques.

Lorsque une charge est appliquée sur un matériau, sa réponse en contrainte peut être déterminée grâce à deux termes. Le premier dépend du module de Young et se traduit par une elongation rapide du matériau et le second dépend du fluage et se traduit par une elongation beaucoup plus lente dans le temps.

II.2.5. Chocs et vibrations

Le choc est un évènement qui peut apparaître pour des applications qui évoluent dans un environnement à forts champs de pesanteur ou encore des dispositifs qui chutent. Il crée un transfert d'énergie mécanique à travers la structure qui peut être à l'origine de défaillances catastrophiques (fracture, cisaillement de fils ou collage) ou paramétriques (augmentation de la tension de sortie). De plus, la présence de microfissures ou de gradient de contraintes important peut générer une diminution de la résistance aux chocs.

L'analyse des microsystèmes défaillants a montré que les premiers problèmes rencontrés étaient des problèmes de connections et d'encapsulation, suivis des problèmes de collage au substrat. Viennent ensuite des problèmes d'endommagement de structures et de fracture du boîtier.

En ce qui concerne les vibrations, ils peuvent provoquer des défaillances catastrophiques en diminuant les adhésions de surface ou en fracturant les structures.

Afin d'apporter à résoudre les problèmes de vibrations, la fréquence de résonance d'une structure doit être éloignée de la fréquence de vibration afin d'éviter le couplage entre vibration et environnement du microsystème.

II.2.6. Influence de l'humidité sur les microsystèmes

L'humidité relative (HR) est un facteur important de diminution de la fiabilité des microsystèmes. En effet, en même temps que la taille des composants diminue, le ratio surface sur volume augmente et les forces surfaciques deviennent plus importantes. Les effets néfastes de l'HR sur les microsystèmes sont la présence de débris dus à l'usure, le collage de structures et la diminution des performances électriques selon le degré d'humidité ambiante. Les études menées par Patton et al. sur un micromoteur électrostatique montrent que les performances électriques diminuent et la performance mécanique augmente lorsque l'on augmente l'HR [17,23]. De plus, les études sur la partie mécanique des microsystèmes montrent que les défaillances sont provoquées par l'usure à de très faibles HR et par un fort collage à de très fortes HR. En effet, lorsque l'HR est faible, le volume de débris générés augmente dramatiquement. Pour des HR comprises entre 20 et 60%, la couche d'eau absorbée forme des hydroxydes en surface qui agissent comme une couche lubrifiante, générant de faibles amas de débris et augmentant considérablement la durée de vie. Pour de fortes HR, le collage apparaît comme la principale cause des défaillances.

A 1,8% d'humidité relative les débris se situent principalement à la surface d'un micromoteur Comme le montre la figure 31.

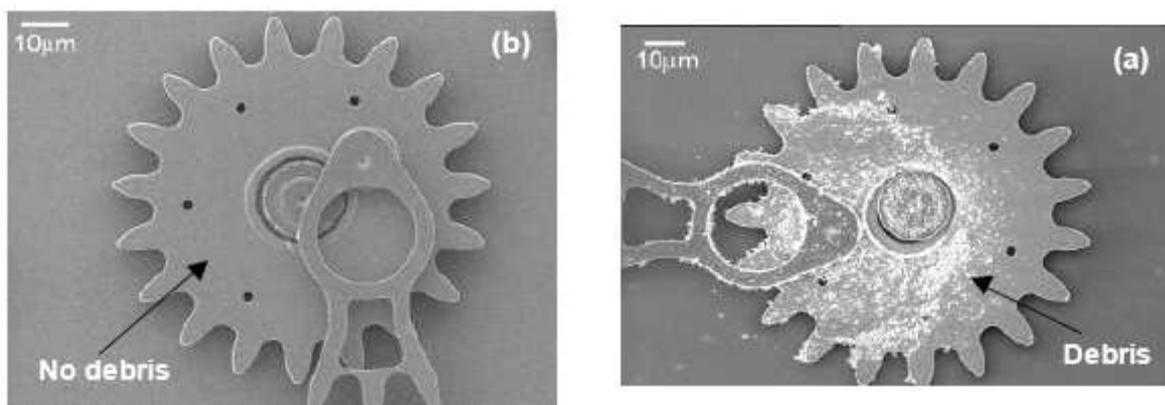


Figure 31: Micromoteur (a) à 30% et (b) à 1,8% d'humidité relative [23]

III. ENCAPSULATION

L'encapsulation (packaging) est aussi important pour les MEMS que pour les circuits intégrés. Il s'agit d'établir les interconnexions entre le MEMS et d'autres circuits, ainsi que de maintenir un environnement de fonctionnement adéquat. Des problèmes se posent de façon critique dès qu'il s'agit de microsystèmes devant travailler en environnement sévère. On trouve de façon courante des environnements avec des températures relativement hautes (120-200°C) et en atmosphères humides, des températures très hautes (supérieures à 200°C), des atmosphères abrasives ou corrosives (présence de chlore par exemple).

Aux contraintes existantes déjà pour les circuits intégrés électroniques, il faut rajouter les contraintes propres à des parties mécaniques. Par exemple, on fera plus attention aux moyens d'évacuer la chaleur dégagée par la partie électrique et les frottements mécaniques. Le boîtier sert à la fois de support mécanique, de protection contre l'environnement, et de support de connexions avec le monde extérieur. Sa mise au point est cruciale pour un MEMS.

Des matériaux innovateurs sont exigés puisque les couches résistantes chimiques conventionnelles telles que Si_3N_4 n'offrent pas la protection suffisante contre les environnements fortement alcalins [26].

Chapitre III

Elaboration et Réalisation du microcapteur

I. L'anémomètre à fil chaud

1.1. Introduction

L'anémomètre à fil chaud est une technique de mesure de la vitesse d'un fluide en un point fixe, de mise en œuvre assez simple et bon marché. Son avantage majeur est son excellente résolution spatiale et temporelle, qui en font la technique de choix pour l'étude des fluctuations turbulentes [28-32].

Historiquement, l'anémomètre à fil chaud a été inventé par Weber en 1894. Puis la théorie du fil chaud fut développée par King en 1914. De façon générale, le fonctionnement de cet anémomètre est basé sur le transfert de chaleur entre un fil chauffé par effet joule et un fluide s'écoulant autour du conducteur. Dans le cas où le fluide est de l'air, la mesure de la vitesse du vent est alors réalisée en détectant les variations de résistance du conducteur lorsque ce dernier est parcouru par un courant continu et qu'il est refroidi par le vent.

L'anémomètre présenté dans ce mémoire est un anémomètre à fil chaud dont l'élément sensible est un film de silicium polycristalin. La technologie utilisée pour fabriquer ce capteur est de type MEMS (Micro Electro Mechanical System) car celle-ci permet de réaliser des composants miniatures à moindre coût [3,28].

I.2. Principe de l'anémomètre à fil chaud

Comme l'illustre la figure 32, un capteur à fil chaud se compose de son élément sensible qui est soit un fil métallique, soit un film semi-conducteur, de deux électrodes métalliques et d'un substrat. L'élément sensible de ce capteur est entouré de l'air ambiant qui se trouve à la température T_a . Mais le courant qui traverse l'élément sensible, chauffe ce dernier et le porte à une température $T_f > T_a$. Lorsque le vent souffle sur le fil chaud, le refroidissement causé par la circulation de l'air, engendre des variations de la résistance du capteur. Pour mesurer la vitesse du vent, il suffit de détecter de telles variations.

Le capteur décrit par la figure 32, comporte une petite cavité qui a été aménagée sous l'élément sensible. Cette cavité qui agit comme un corps noir, permet d'accélérer les échanges thermiques entre le capteur et l'air ambiant. L'air s'écoule alors le long de la face supérieure de l'élément sensible tandis que la circulation d'air sous celui-ci est animée d'un mouvement turbulent.

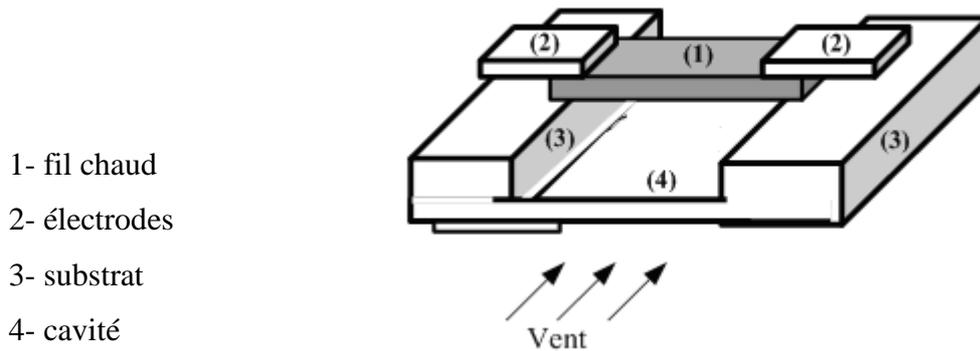


Figure 32 : Description du capteur à fil chaud

I.3. Construction de l'anémomètre

La fabrication du capteur comporte sept étapes principales décrites par les figures 33, 34 et 35. Elle permet de réaliser un seul capteur et ses électrodes sur un substrat de 1 cm^2 , avec uniquement trois niveaux de masquage. Le masque N° 1 est utilisé une première fois pour la réalisation de la cavité et une deuxième fois, pour la protection des capteurs avant que l'opération de gravure ne libère le capteur à fil chaud de son substrat. Les masques N° 2 et 3 servent à réaliser le fil chaud tout en permettant à ce dernier d'être séparé de son substrat par une couche d'isolant thermique et électrique (silice ou nitrure).

Au début du processus de fabrication, une lamelle de silicium monocristallin de 4 pouces de diamètre est employée comme substrat.

➤ La première étape :

La première étape consiste à déposer une couche de nitrure de silicium (Si_3N_4) sur cet échantillon (voir figure 33a) au moyen de la technique PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition Technique). L'épaisseur de cette couche est alors de $0,3\mu\text{m}$.

➤ La deuxième étape :

Dans une seconde étape, le matériau de nitrure de silicium est recouvert par le masque N°1 (voir figure 33b). Il est ensuite traité par lithographie et la partie non masquée du film est éliminée par gravure humide avec l'acide fluorhydrique (voir figure 33c).

Une fenêtre de $50 \times 30\mu\text{m}^2$ est ainsi creusée dans la couche de nitrure de silicium.

➤ **La troisième étape :**

La figure 33d illustre la troisième étape revient à oxyder le substrat de silicium se trouvant en dessous de la fenêtre en exposant celui-ci à une atmosphère humide et à une très grande température. On obtient alors une épaisseur de 0,5 μm de silice qui remplit complètement la fenêtre.

➤ **La quatrième étape :**

La figure 34a décrit la quatrième étape du processus de fabrication. Au cours de cette étape, la technique LPCVD (Low Pressure Chemical Vapour Deposition) est employée pour déposer une couche de silicium polycristallin de 0,5 μm sur l'échantillon de silicium considéré à la température de 600°C. Le film de silicium polycristallin est ensuite dopé avec du bore dont la concentration totale est égale à $5 \cdot 10^{14}$ atomes/cm². A cet effet, nous avons procédé par implantation ionique. Notre échantillon de silicium est ensuite soumis à une température de 1000°C pour activer les dopants et pour réduire le stress intrinsèque.

➤ **La cinquième étape :**

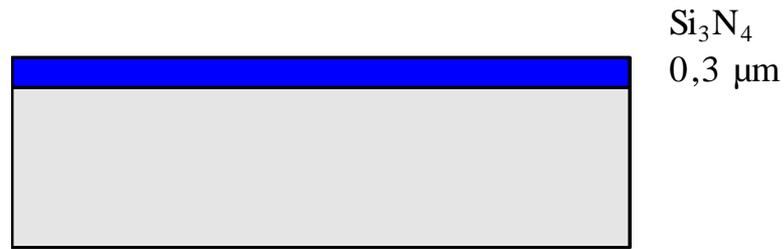
La cinquième étape est la formation du fil chaud en appliquant le masque N°2 au film de silicium polycristallin (figure 34b). Pour ce faire la partie visible de ce matériau est éliminée à l'aide de la technique RIE (Reactive Ion Etching). La structure qui en résulte, est alors celle décrite par la figure 34c.

➤ **La sixième étape :**

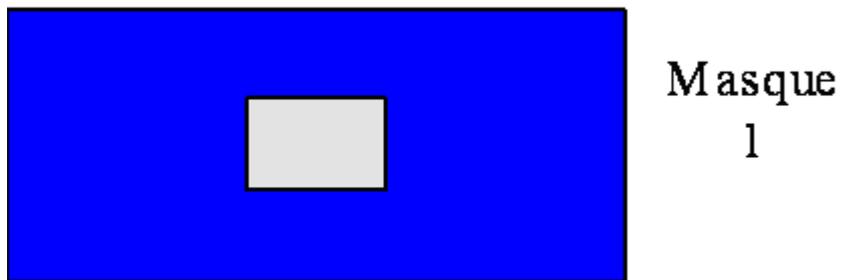
La sixième étape est le dépôt d'une couche d'aluminium de 1,7 μm d'épaisseur à la partie supérieure d'une telle structure (figure 35a). Cette opération est réalisée par pulvérisation cathodique.

➤ **La septième étape :**

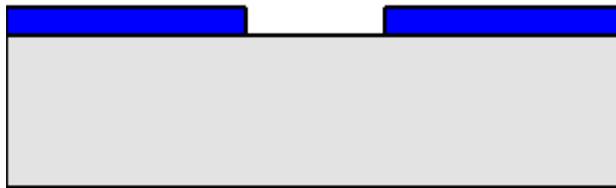
La septième étape est l'élaboration des électrodes métalliques du fil chaud grâce à une troisième lithographie. Le masque N°3 utilisé dans ce cas, est décrit par la figure 35b. Après attaque chimique, on obtient les électrodes de la figure 35c. L'étape finale est la formation d'une cavité de 300 μm^3 par élimination de la silice sous le fil chaud (figure 35d).



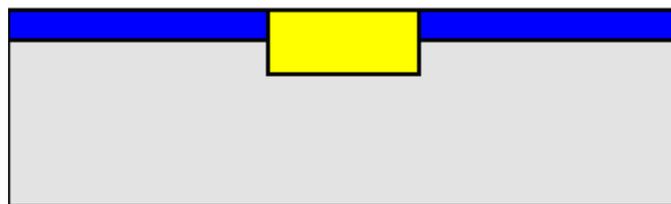
(a) Dépôt d'une couche de nitrure de silicium de $0,3 \mu\text{m}$ d'épaisseur.



(b) Masque N° 1.

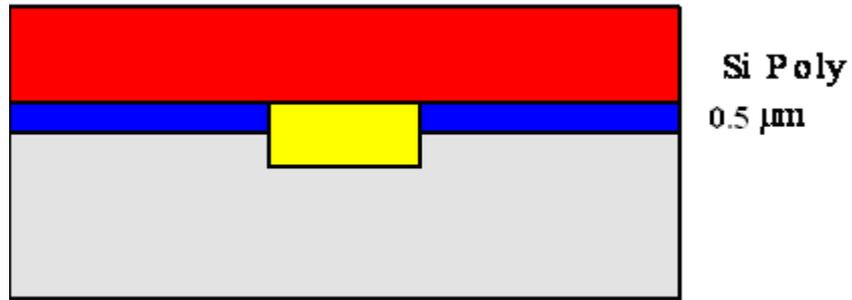


(c) Gravure d'une fenêtre de $50 \times 30 \mu\text{m}^2$.

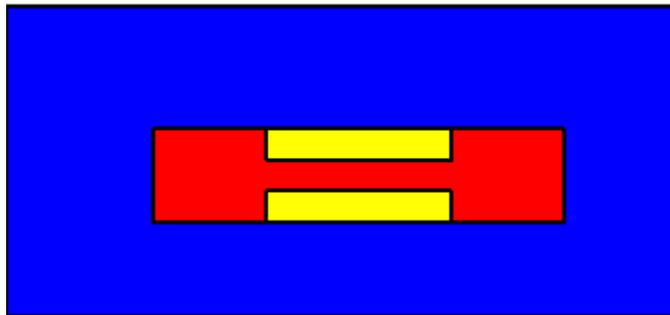


(d) Oxydation du substrat de silicium.

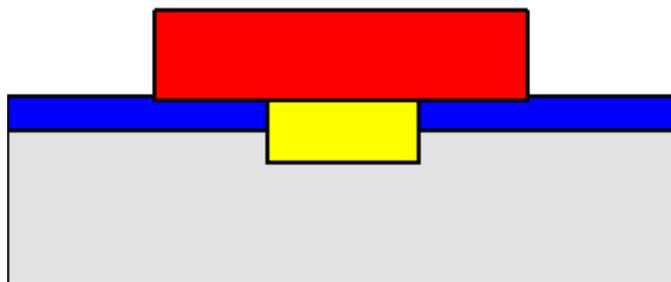
Figure 33 : Etapes de fabrication de l'anémomètre à film de silicium polycristallin



(a) Dépôt d'un film de silicium polycristallin de 0,5 μm d'épaisseur.

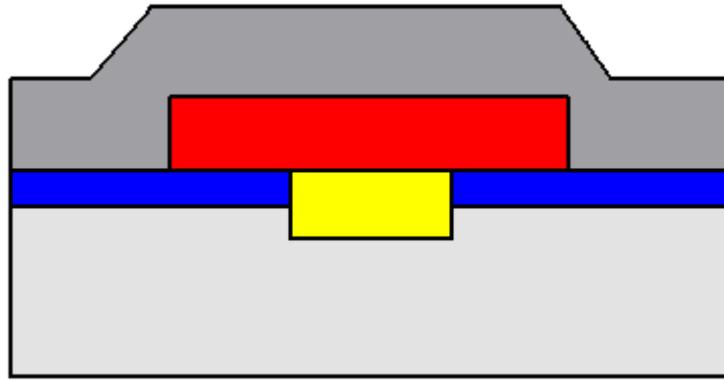


(b) Masque N° 2.

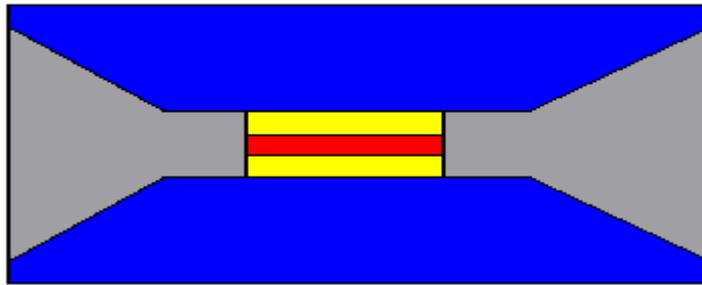


(c) Gravure du fil chaud.

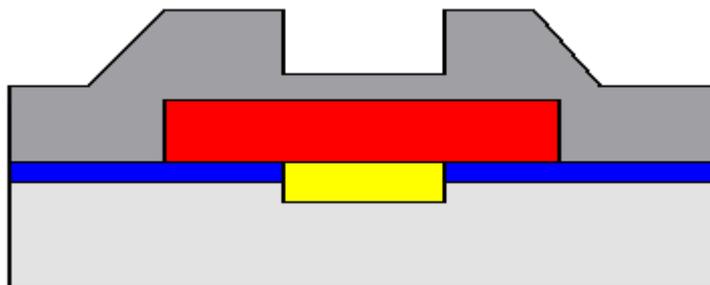
Figure 34 : Etapes de fabrication de l'anémomètre à film de silicium polycristallin



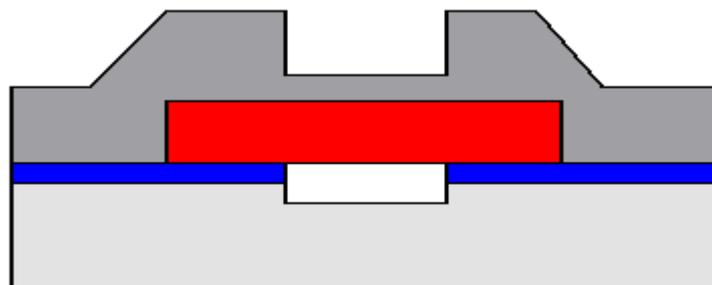
(a) Dépôt d'une couche d'aluminium de $1,7 \mu\text{m}$ d'épaisseur.



(b) Masque N° 3



(c) Formation des électrodes.



d) Création de la cavité sous le fil chaud.

Figure 35 : Etapes de fabrication de l'anémomètre à film de silicium polycristallin

En réalité, le processus de fabrication ne s'applique pas qu'à la réalisation d'un seul capteur. Mais, en suivant les étapes décrites par les figure 33, 34,35, près de quarante à cinquante capteurs à film de silicium polycristallin sont simultanément produits sur une seule lamelle de silicium monocristallin de 4 pouces de diamètre. La figure 36 donne une photographie d'un ensemble d'anémomètres à fil chaud réalisés sur le même substrat. Deux sortes de capteurs ont été fabriqués : sans cavité sous le fil chaud et avec cavité, dans ce dernier cas, on utilise de nouveau le masque n°1 pour recouvrir les capteurs pour former les cavités et on procède à une gravure humide avec une solution d'acide fluorhydrique pour éliminer le dépôt de silice sous chacun des éléments sensibles. Cette attaque chimique est réalisée à la température de 30°C (bain de HF/FNH₄) avec un temps de gravure d'environ 30 mn, soit une vitesse de 0.1µm/mn. Enfin ces capteurs sont séparés les uns des autres en procédant à leurs découpes avec une scie diamantée.

Les films de silicium polycristallin obtenus, sont d'épaisseur égale à 0.5µm, de longueur allant de 45 à 58µm et de largeur allant de 2 à 5µm. En phase finale de fabrication, ces capteurs ont tous été enrobés dans de la résine liquide d'époxy E501 pour les protéger contre la corrosion et l'oxydation causées par les phénomènes atmosphérique.

La photographie de la figure 37 été prise au microscope électronique. Elle représente l'un des capteurs fabriqué. Les séries de capteurs sont respectivement répertoriées par les lettres A, B, C, D, E, F, G et H et dans chaque série, on trouve 45 capteurs utilisables, ceux situés à la périphérie de lamelle, ont été détériorés au cours des attaques chimiques. La table 1 donne la liste des échantillons réalisés et leurs caractéristiques générales.



Figure 36 : Photo de la distribution des sondes sur une plaque de 4 pouces

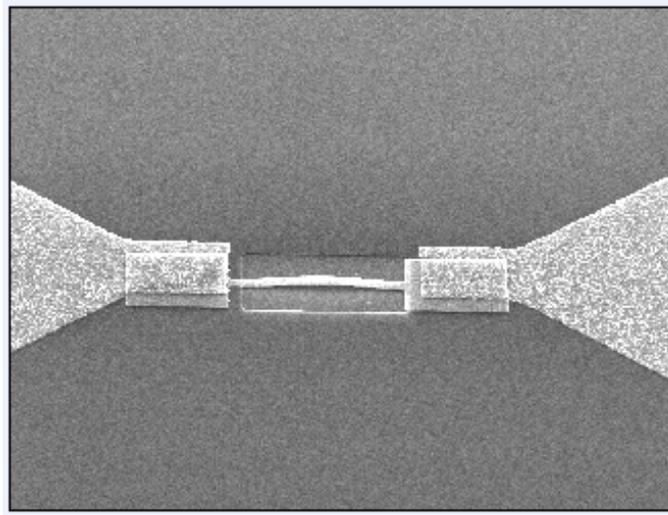


Figure 37 : Photo au microscope électronique d'une sonde.

Désignation de la lamelle	Nombre de capteurs utilisables par lamelle	Dimension (μm^3)	Cavité	Dopage (atome par cm^2)	Energie de dopage (keV)
A	45	40x10x0,5 à 58x10x0,5	Sans	$2 \cdot 10^{14}$	60
B	45	40x10x0,5 à 58x10x0,5	Avec et sans	10^{15}	100
C	45	40x2x0,5 à 58x5x0,5	Avec et sans	$6 \cdot 10^{14}$	60
D	45	40x2x0,5 à 58x5x0,5	Avec et sans	$6 \cdot 10^{15}$	80
E	45	40x2x0,5 à 58x5x0,5	Sans	10^{16}	80
F	45	40x2x0,5 à 58x5x0,5	Sans	$4 \cdot 10^{15}$	60
G	45	40x2x0,5 à 58x5x0,5	Sans	10^{15}	60
H	45	40x2x0,5 à 58x5x0,5	Avec et sans	$5 \cdot 10^{16}$	80

Table 1. Caractéristiques générales des séries de capteurs réalisés en technologie MEMS

II. Défaut de réalisation de la structure :

Avant d'arriver au protocole de réalisation du micro anémomètre décrit précédemment nous avons constaté en fonction des étapes de sa fabrication plusieurs défauts. Ces défauts sont engendrés essentiellement lors de l'élaboration de la cavité.

II.1. Le collage du fil en polysilicium : le collage peut se faire entre deux structures ou entre une structure et le substrat. Il est dû :

- aux forces d'attraction exercées pendant le séchage de la structure, après libération des structures ;
- à la mauvaise gravure de la couche structurelle

La figure 38 montre des photographies au microscope électronique de l'anémomètre après formation de la cavité. On observe le collage du fil chaud au substrat du au ménisques de liquide qui apparaissent entre la structure et le substrat lors de la gravure humide.

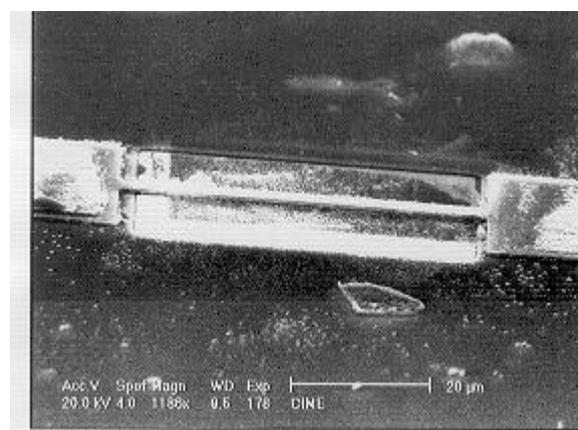
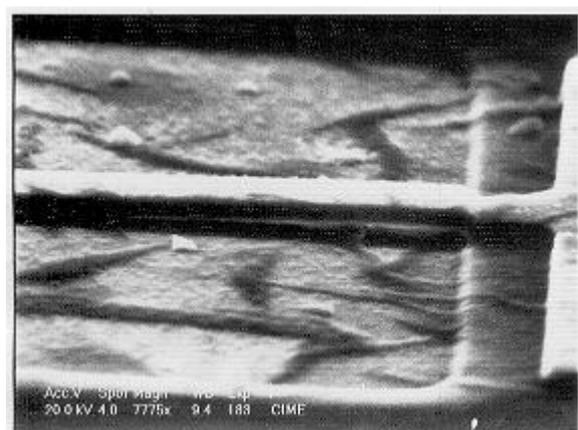


Figure 38 : Collage de la poutre après gravure de l'oxyde

II.2. Défauts de gravure :

Une présence de résidus non gravés lors de la fabrication de nos capteurs anémométriques peut causer des problèmes pendant leurs fonctionnements.

La figure 39 nous donne des photographies au microscope électronique de l'anémomètre après gravure de la silice sous la cavité. On observe des résidus de silice.

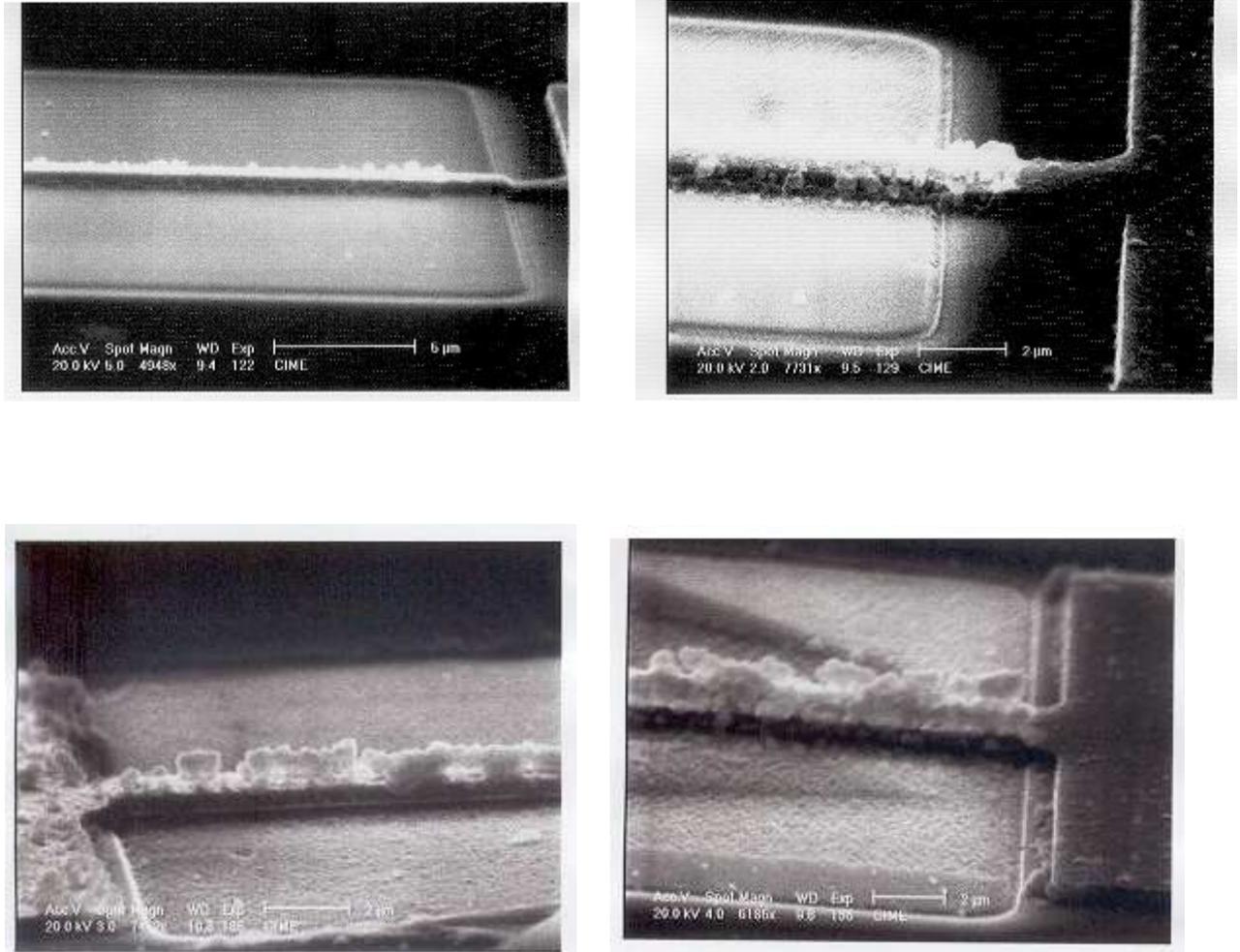


Figure 39 : Définition de la cavité avec quelques résidus

La figure 40a montre l'anémomètre avant la gravure de la silice pour former sa cavité.

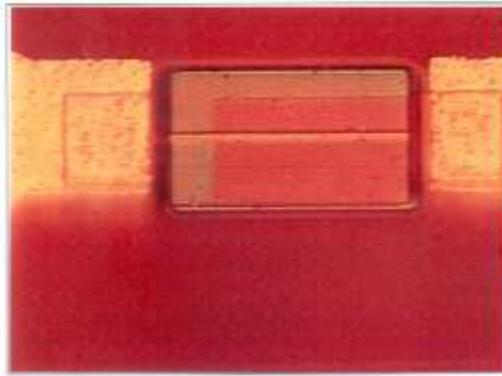


Figure 40a : L'anémomètre avant gravure

La figure 40b montre des débris d'oxyde sous le fil chaud après élimination de la silice SiO_2



Figure 40b : Présence de débris d'oxyde

La figure 40c montre le collage du fil chaud après gravure de la silice SiO_2



Figure 40c : Collage du fil chaud

La figure 40d montre l'anémomètre après gravure de la silice ou l'Aluminium est attaqué la ou il n'y a plus de résine peu résistante aux attaques chimiques.

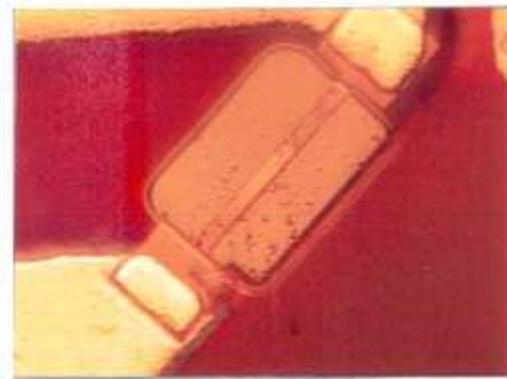


Figure 40d : Détérioration des électrodes

La figure 40e montre l'anémomètre Après gravure SiO_2 ou il reste des débris de résine mal gravés



Figure 40e : Débris de résine mal gravés

Figure 40 : Les défauts de fabrication après la gravure.

III. Caractérisation électrique de l'anémomètre

III.1. L'influence de la géométrie du fil sur le courant parcouru

La figure 41 correspond à des mesures de courant I en fonction de la tension V , prises à 100°C pour différentes géométries de fils chauds. On remarque que la géométrie du fil chaud joue un rôle important. En effet, pour des fils de section plus larges, il est nécessaire de les parcourir avec un courant plus important pour avoir un même niveau de tension. On remarque aussi que, à section identique, c'est le fil le plus long qui admet à tension identique, l'intensité du courant la plus faible.

A certaine valeur de la tension le fil chaud perd ses caractéristiques physiques et se déforme jusqu'à la rupture (figure 42), à ce moment là le courant ne passe plus.

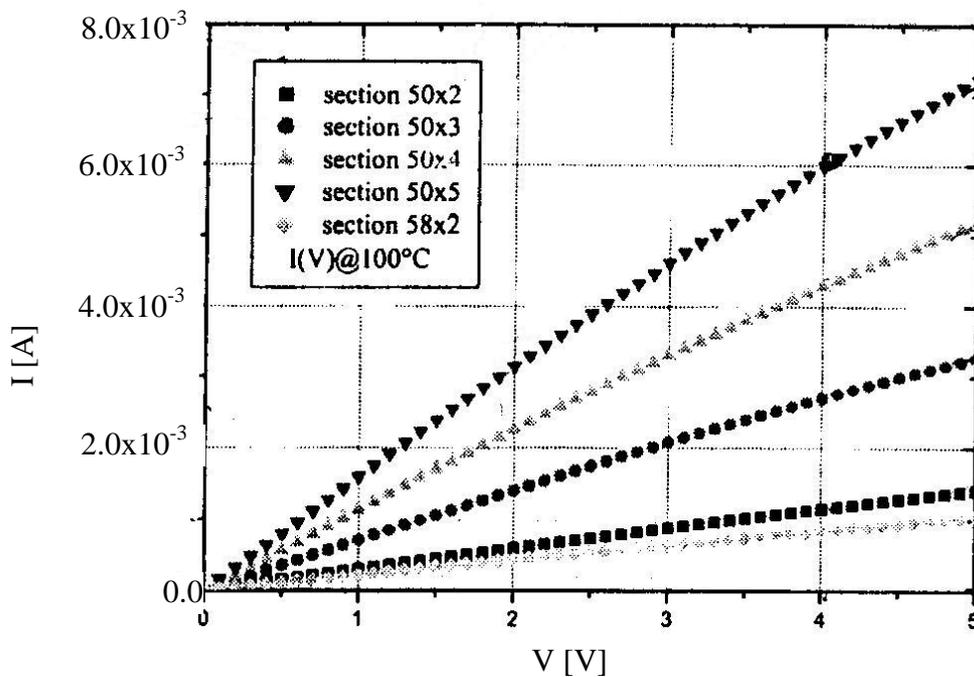


Figure 41 : Courbe $I(V)$ pour différentes géométries (section en μm^2), prise à 100°C .

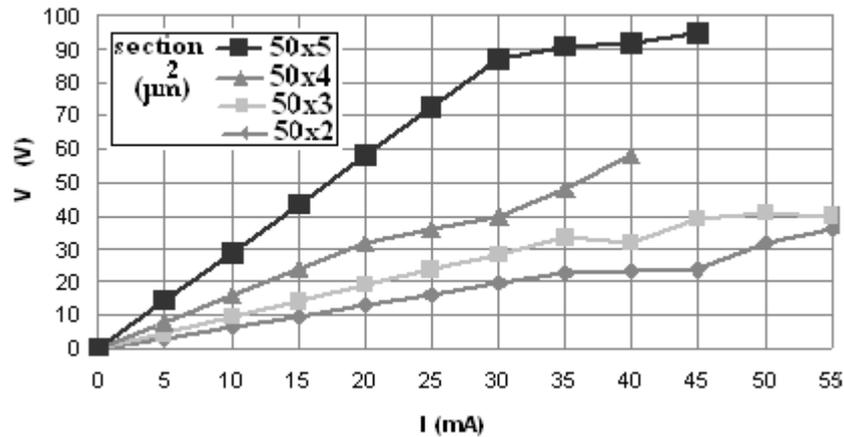


Figure 42 : Courbe I (V) jusqu'à rupture du fil chaud

III.2. Dépendance de la résistivité du fil chaud avec la température

La dépendance de la résistivité d'un matériau en fonction de la température est utilisée depuis de nombreuses années pour réaliser des capteurs. Cette dépendance se mesure grâce au TCR (Temperature Resistivity Coefficient), qui est le rapport de la variation relative de résistance sur la variation de température, mesuré généralement autour d'une température de référence de 0°C. Les métaux ont un TCR positif et de l'ordre de $5 \times 10^{-3} /K$, relativement constant avec la température. Les semiconducteurs ont eux un TCR négatif, bien plus élevé que les métaux, mais qui présente l'inconvénient d'être très fortement dépendant de la température. Le platine est le métal le plus communément utilisé, car il a, en plus d'un TCR élevé, une résistivité très linéaire avec la température. Le silicium polycristallin, lui, a un TCR généralement plus faible que les métaux. Il reste néanmoins à un bon niveau, et présente l'avantage de pouvoir être ajusté en jouant sur le dopage. On peut ainsi contrôler la résistivité et le TCR du silicium polycristallin, ce qui n'est pas possible pour les métaux.

III.2.1. Essais sur les échantillons réalisés

Les expériences réalisées au laboratoire de tests à l'IMEP sont un ensemble de manipulations qui nous ont permis d'étudier les variations de la résistance des capteurs en fonction de la température, de déterminer leurs TCR, de vérifier l'efficacité du dopage, de mesurer leurs niveaux du bruit.

Ainsi, les différents prototypes ont été caractérisés sous pointes sur plaque chauffante afin de déterminer leur comportement en température (TCR), et pour estimer le courant de polarisation nécessaire au fonctionnement du capteur. Cette expérience est schématisée par la figure 43 elle comporte une plaque chauffante sur laquelle on dépose les échantillons et grâce à un traceur de caractéristiques le HP 4155 on détermine la résistance de chaque capteur.

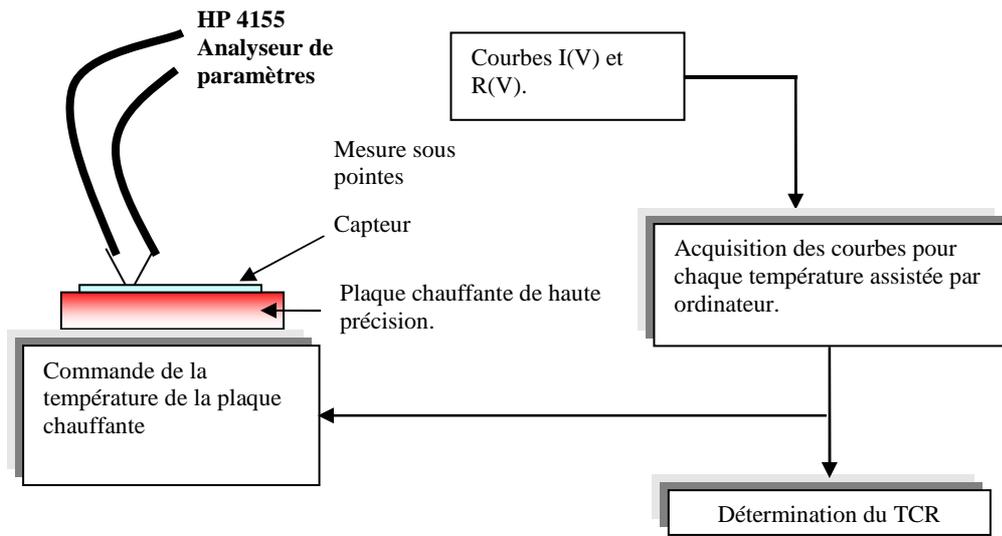


Figure 43 : Mesure du TCR de la sonde sur une plaque chauffante

La figure 44 montre la variation de la résistance du capteur en fonction de la température. On remarque bien une bonne linéarité de la courbe. En plus, la variation de la température a été faite de manière ascendante et descendante et nous avons remarqué une bonne reproduction des mesures sans l'effet d'hystérésis.

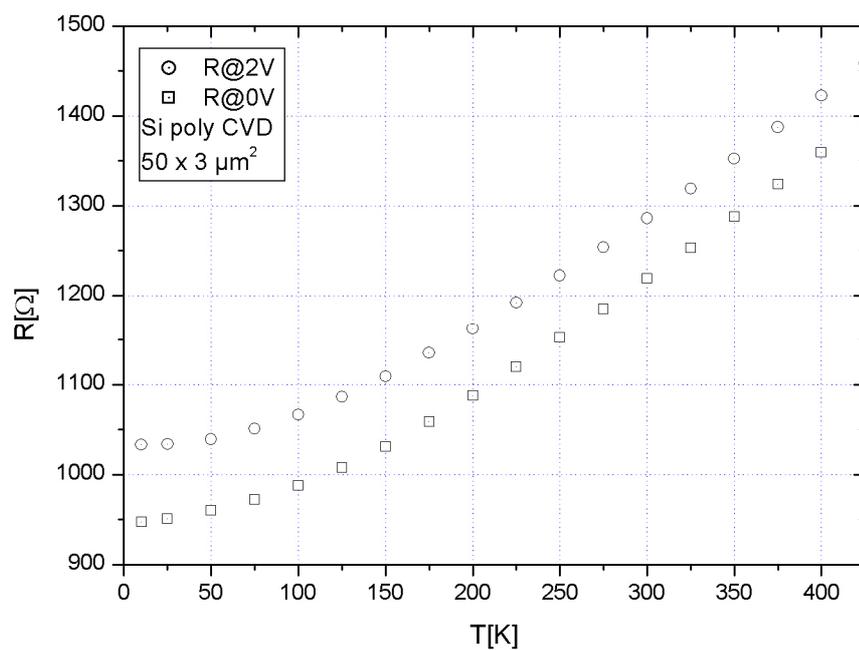


Figure 44 : Mesure de la résistance du capteur pour des basses températures

III.2.2. Influence du dopage du polysilicium sur le coefficient de température

III.2.2.1. Conduction électrique dans le silicium polycristallin

La théorie de conduction dans le silicium polycristallin est basée sur un modèle où la surface de la barrière est développée au joint de grain du matériau [33-40]. Les barrières proviennent des charges piégées à la surface. Ces électrons piégés créent une zone de surface de déplétion et une barrière de potentiel à chaque joint de grain.

Les joints de grains d'un polycristallin se composent d'atomes désordonnés et contiennent un grand nombre de défauts, qui conduisent à la formation des états de surface capables de piéger les porteurs libres. Ainsi le nombre de porteurs libres disponible pour la conduction électrique est réduit.

En raison de la nature désordonnée du joint de grain, la différence d'énergie du joint de grain matériau peut être considérée comme la différence d'énergie entre un cristal simple et un matériau amorphe. Ce qui résulte de la formation d'une hétérojonction à l'interface entre le grain et le joint de grain. Ainsi l'effet des joints de grains peut être représenté par un rectangle de barrières de potentielles [35].

La hauteur de chaque barrière de potentiel par rapport à la bande de valence E_{v0} est ϕ (≈ 0.16 V) et sa largeur δ est prise approximativement égale à la largeur du joint de grain comme le montre la figure 45 pour silicium polycristallin de type p. W_g est la largeur de la zone de déplétion, E_t est le niveau d'énergie des états de densité fixe dans les joints de grains.

On applique ce modèle pour une conduction unidimensionnelle. La tension V_a à travers un individuel grain est divisée entre la composante région joint de grain V_0 et grain V_c

$$V_a = V / N_g \quad (3-1)$$

N_g est le nombre de grain de dimension moyenne D

V est la tension appliquée au matériau polycristallin

$$\text{Et} \quad V_a = V_0 + V_c \quad (3-2)$$

La tension V_0 est partagée entre la barrière du joint de grain et les deux régions de déplétion.

Tous les états d'interface sont occupés par des porteurs, ce qui est vrai pour un polysilicium fortement dopé, et la hauteur des barrières de potentiel devient beaucoup plus petite que la hauteur des barrières de potentiel des joints de grains, et la zone de déplétion aux grains devient très étroite. Le mécanisme de transport prédominant est l'émission

thermoionique des porteurs au dessus des barrières de potentielles qV_g et l'effet tunnel à travers les joints de grains ($qV_g < E < q\phi$).

Pour un dopage faible ou modéré, la barrière de potentiel de chaque joint de grain est trop large pour considérer l'effet tunnel, le mécanisme de transport prédominant est l'émission thermoionique des porteurs majoritaires au dessus des barrières.

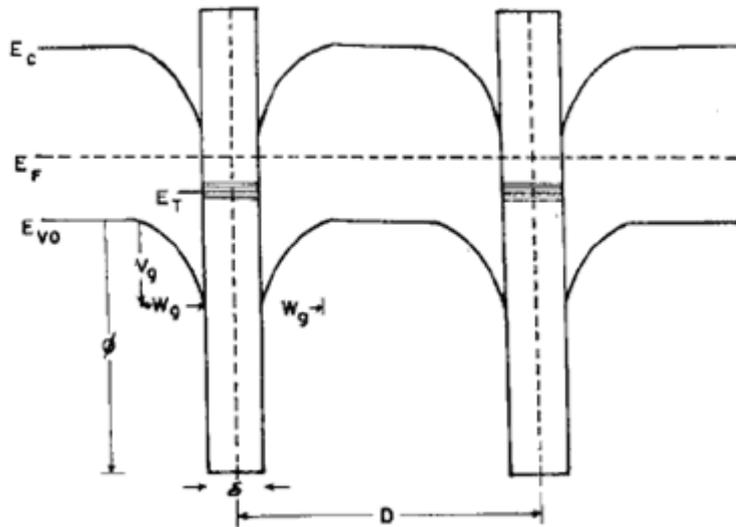


Figure 45 : Modèle de bandes d'énergie du silicium polycristallin [35]

La figure 46 nous donne la courbe expérimentale de courant traversant le fil chaud de la lamelle H en fonction de la tension à ses bornes.

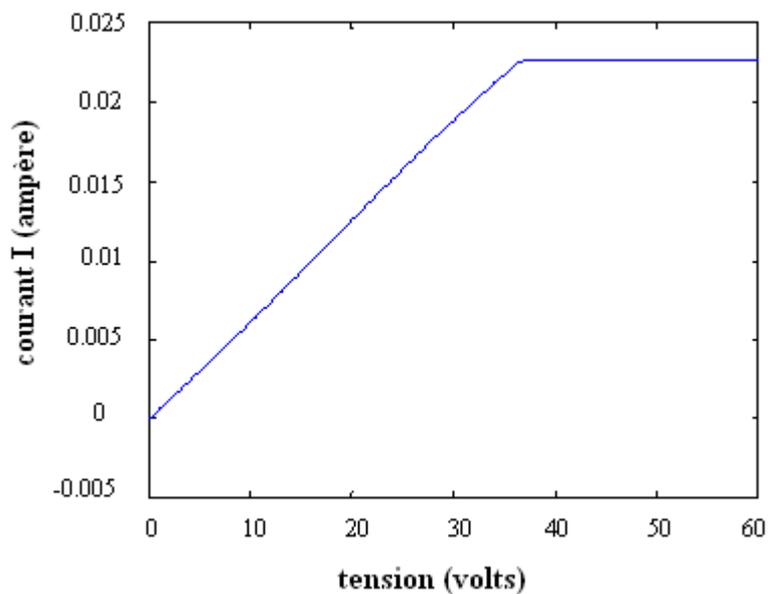


Figure 46 : Caractéristique I (V) de l'anémomètre

La résistivité ρ du silicium polycristallin est modélisé pour résulter une série de combinaison de deux termes : résistivité volume du grain ρ_c , résistivité barrière à travers les joints de grain ρ_b . Il s'avère ρ_b domine pour un dopage faible et modéré. La résistivité est très sensible au faible dopage allant de 10^{16} à 10^{18} $\text{atm}/\text{cm}^{-3}$. pour un fort dopage au dessus de 10^{20} $\text{atm}/\text{cm}^{-3}$ ρ_c domine et la résistivité devient relativement insensible aux variations du dopage [34].

III.2.2.2. Influence du dopage du polysilicium sur le TCR:

Dans beaucoup d'applications, il est important de savoir la dépendance de la résistivité du polysilicium en fonction de la température. Puisque nos couches minces sont fortement dopées, on a choisi d'utiliser la loi des métaux pour décrire l'influence de la température sur la résistivité :

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha T + \beta T^2) \quad (3-3)$$

où ρ_0 est la résistivité à une température de référence (généralement 0°C), et ρ la résistivité à la température T .

Pour un polysilicium de type p, la résistivité diminue quand le dopage augmente jusqu'à 10^{20} $\text{atm}/\text{cm}^{-3}$ comme le montre la figure 47 pour différentes températures

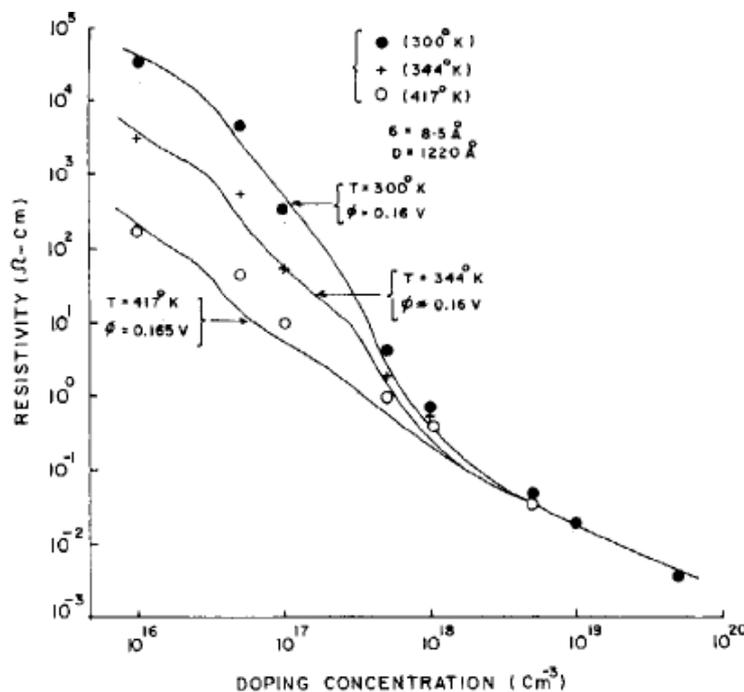


Figure 47 : Variation de la résistivité en fonction de la concentration du dopage pour un polysilicium de type p pour différentes température [35]

On définit ainsi le TCR (Temperature Coefficient of Resistivity) :

$$TCR = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial T} \quad (3-4)$$

TCR est défini comme le rapport de la variation de la résistivité sur la variation de température, comme la résistivité varie en fonction du dopage donc même le TCR varie en fonction du dopage.

Pour l'anémomètre étudié les valeurs du TCR et son signe dépendent du dopage du polysilicium. A titre d'exemple, le TCR vaut $-10.3 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ pour un dopage $4 \cdot 10^{18} \text{ atm/cm}^{-3}$ et $14,2 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ pour un dopage $10^{21} \text{ atm/cm}^{-3}$.

La figure 48 nous donne la courbe expérimentale de variation du coefficient de température α en fonction du dopage N_a du fil chaud polysilicium

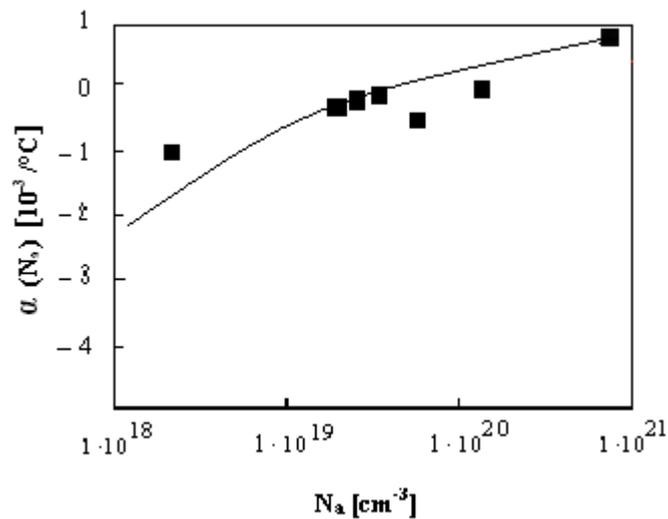


Figure 48 : Dépendance du TCR de l'anémomètre en fonction du dopage du polysilicium

Chapitre IV

Etude de la fiabilité de l'anémomètre à
fil chaud

I- Introduction

Nous décrivons dans ce chapitre les différents tests effectués sur l'anémomètre pour faire une première approche des comportements défailants des microsondes. En effet, en appliquant un trop fort courant, les températures présentes dans le fil sont très élevées et le polysilicium peut perdre ses propriétés de plasticité. Cette limitation entraîne l'apparition de défauts que nous présenterons dans ce chapitre, par exemple le flambement fil chaud.

Ensuite, nous aborderons le test de vieillissement mené sur les microsondes et nous donnerons la courbe de vieillissement de l'anémomètre qui nous permettra de déterminer la durée de vie du capteur.

Des mesures de bruit $1/f$ ont été effectuées pour l'anémomètre et aussi des expériences de corrosion au chlore de l'anémomètre ont été réalisées à des températures 400°C et 600°C pour l'étude de la fiabilité de nos capteurs devant travailler en environnement sévères.

II- Définition et optimisation des tests

La conception d'un test de fatigue accélérée consiste à simuler des conditions de fonctionnement réelles mais en « forçant » les paramètres : intensité du courant en mode pulsé ou continu, durée des impulsions, température environnante du composant... pour accélérer le phénomène de dégradation.

II- 1 Test statique

Le capteur va être soumis à l'effet d'un courant continu de 30mA en permanence jusqu'à défaillance du capteur.

La figure 49 montre l'effet du stress qui se traduit par une fissure dans l'élément sensible du capteur.

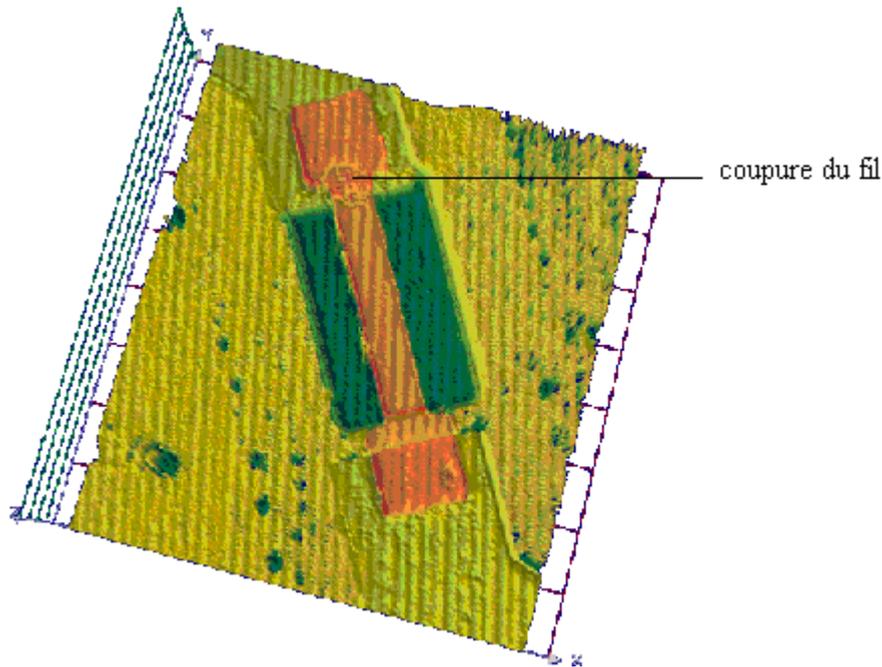


Figure 49 : Image AFM 3D du capteur stressé à 30 mA

II- 2. Particularités observées pendant les tests

II.2.1. Adhésion du fil chaud avec le substrat

L'étape finale de la fabrication de l'anémomètre est la formation d'une cavité de $300\mu\text{m}^3$ par élimination de la silice sous le fil chaud par une gravure humide.

Lors du séchage de la gravure, des ménisques de liquide peuvent apparaître entre la structure et le substrat. En séchant, ces ménisques attirent la structure vers le substrat et cela entraîne une adhésion entre ces deux parties.

Aussi cette adhésion du fil chaud avec le substrat est un mécanisme de défaillance de cette structure. Elle serait due à l'effet de l'humidité ambiante durant les tests de fonctionnement.

La figure 50 montre le collage du fil chaud avec le substrat.

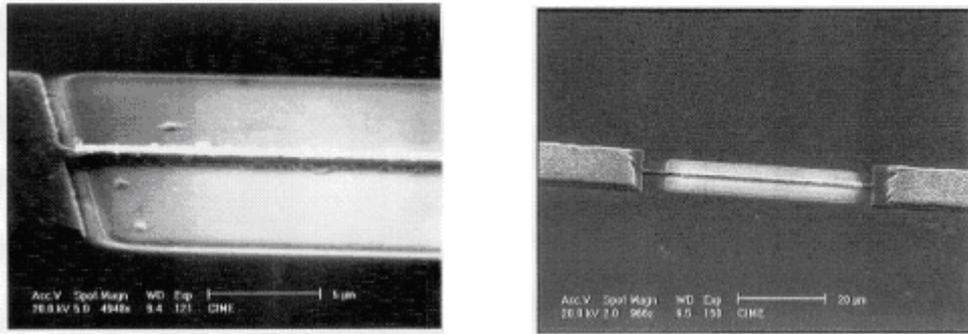


Figure 50 : Adhésion du fil chaud avec le substrat

II.2.2. Flambement du capteur à fil chaud

Un autre comportement observé durant les tests de caractérisation est le flambement du fil chaud. Ce comportement est induit par l'application d'un courant trop important. La structure en étant chauffée subit des reconfigurations locales des grains de silicium. Ce flambement a été observé avec un microscope électronique à balayage comme le montre la (Figure 51).

L'origine de ce flambement se trouve dans la température atteinte dans le fil chaud en fonction du courant appliqué. En utilisant un courant trop élevé, la température dans le fil chaud atteint un maximum dépassant la température de transition (température à partir de laquelle le matériau devient fragile) qui est de 660 °C pour le silicium [27].

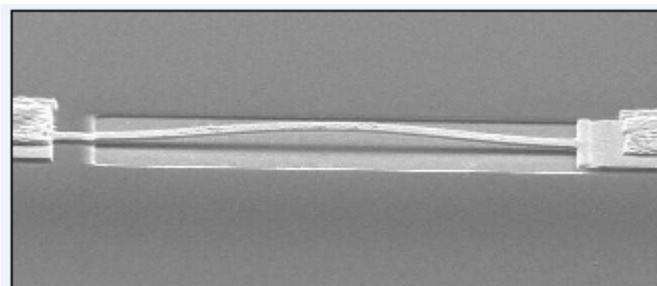


Figure 51 : Flambement du fil chaud

En observant la figure 52 qui illustre le profil de température du fil chaud, on peut se rendre compte que la déformation plastique a lieu à la plus haute température et non aux contraintes internes les plus fortes.

On peut voir que la température la plus élevée est observée dans la portion centrale du fil chaud. Et c'est bien à cet endroit que la déformation plastique a lieu.

Pour caractériser ce défaut, on peut prendre comme hypothèse que le stress en compression limite de flambement du fil chaud est le même que celui pour une poutre encastree à ses deux extrémités [27] et qui s'exprime comme :

$$\sigma_{crit} = \frac{EI\pi^2}{(0,5L)^2} \quad (4.1)$$

où E est le module de Young, I est le moment d'inertie et L est la longueur de la poutre considérée.

Pour pouvoir prédire l'apparition du flambement, il faut alors comparer le stress dans l'élément sensible du à l'élévation de la température et le comparer à cette valeur critique.

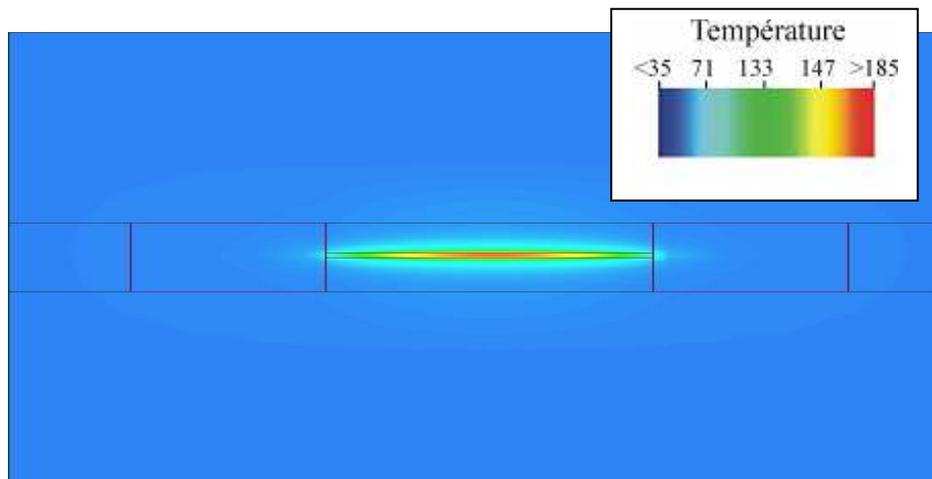


Figure 52 : Profils de température du fil chaud pour un échauffement de 1mW

II. 3. Le test de vieillissement

Après avoir fait des tests en statique, on peut évaluer le courant à appliquer pour avoir un fonctionnement nominal du fil chaud. Une fois cette valeur nominale du courant connue, on peut envisager de faire des tests en dynamique en appliquant un signal périodique pour voir la fatigue de la structure en fonction du nombre de cycles réalisés.

On a choisi de prendre des signaux de fréquence basse, à savoir 1 ou 2 Hz. La valeur limite de la fréquence de ce signal test est le temps de refroidissement du capteur.

Comme la résistance varie avec le courant appliqué, on a cherché à observer les variations de la résistance du capteur au cours d'un cycle de fonctionnement mais aussi au cours du vieillissement.

Au cours de ces tests de vieillissement (i.e. en dynamique), nous avons relevé la résistance du capteur à intervalles réguliers au cours du vieillissement pour pouvoir observer leur évolution.

La courbe de vieillissement du capteur est donnée par la figure 53.

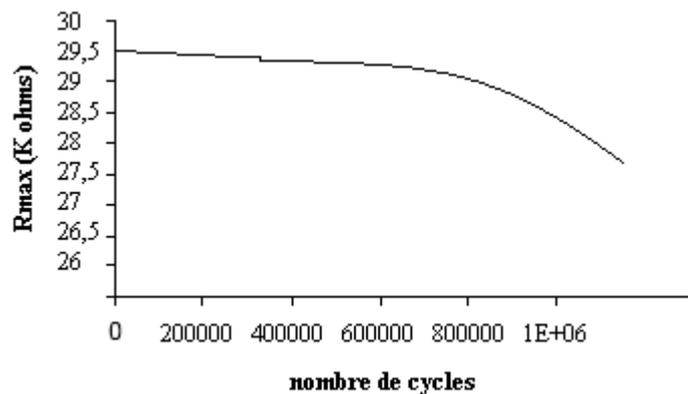


Figure 53 : Courbe de vieillissement de l'anémomètre

En observant cette courbe de variation de la résistance du capteur en fonction du nombre de cycles effectués, on peut se rendre compte que la dégradation se fait progressivement à partir de 200 000 cycles.

Dans l'exemple ci-dessus, le capteur devient défaillant à environ 800 000 cycles de fonctionnement. On peut alors dire que sa durée de vie est d'environ 223 heures (car la fréquence du signal appliqué est 1Hz).

II.4. Test destructif du capteur :

L'augmentation de la surchauffe et du courant électrique détruit le capteur. La figure 54 montre l'un des tests destructifs d'une sonde.

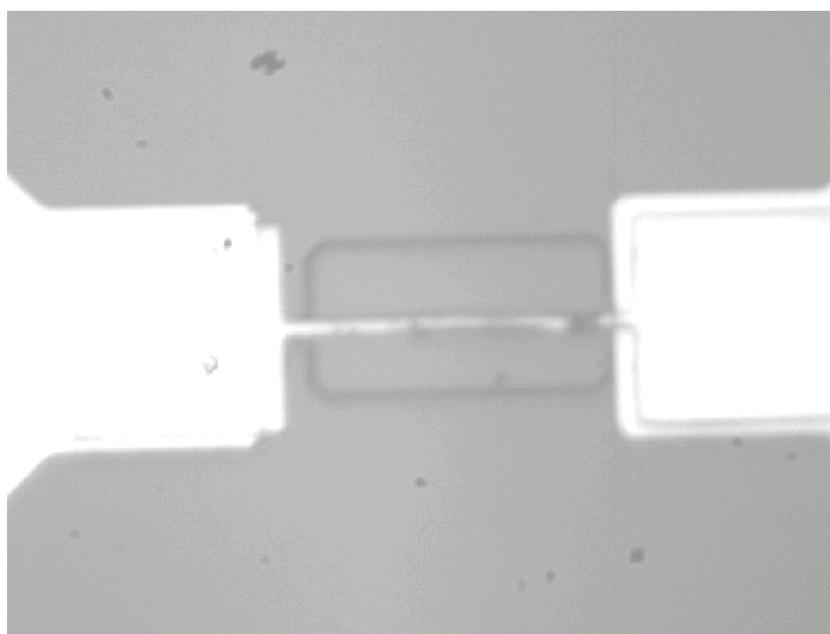
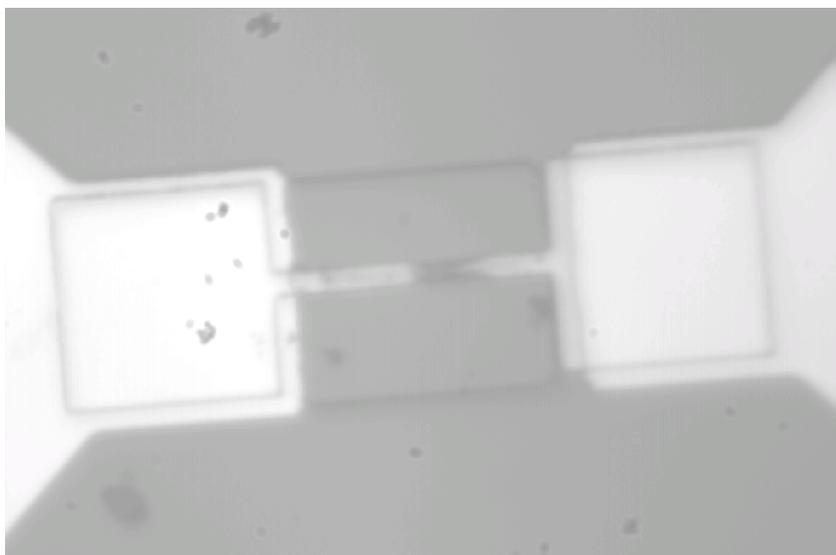


Figure 54 : Test destructif de la microsonde

III- Analyse de la fiabilité

III -1 Dérives en température ambiante:

Après l'étalonnage du capteur en soufflerie, des tests ont été effectués sur celui-ci dans des conditions où il est destiné à être utilisé, il s'est alors posé un problème de fluctuations de la température du fluide [41].

La figure 55 illustre les réponses de la sonde à cinq températures ambiantes :

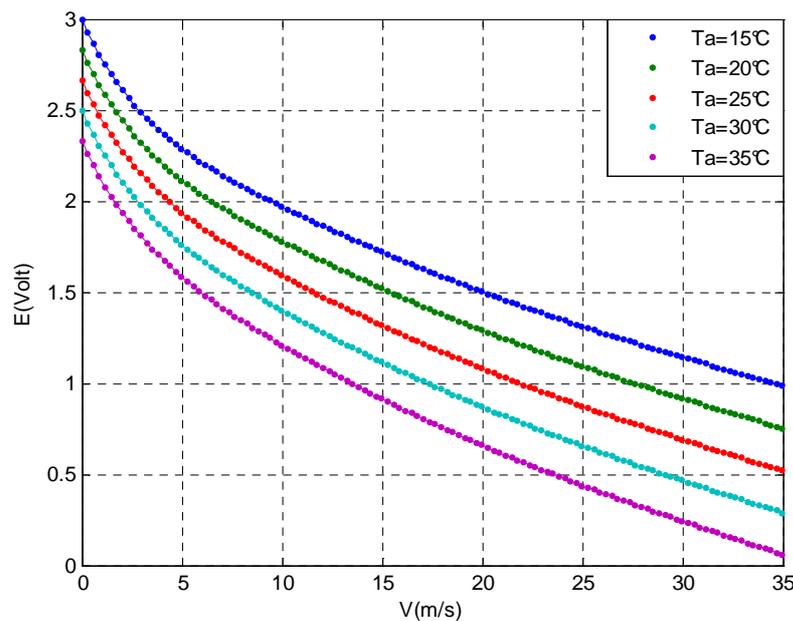


Figure 55 : Réponse du capteur à cinq températures ambiantes [36]

Les résultats obtenus montrent que la réponse de la sonde est dépendante de la température ambiante. Par conséquent une correction est nécessaire durant la phase des mesures.

III .1.1. La compensation des dérives en température

Plusieurs techniques sont utilisées pour la correction de la réponse du circuit du RAS. Pour obtenir un système de linéarisation et de compensation simultanément, on fait appel aux techniques de traitement de signal par le biais de circuits analogiques [42], ou bien aux circuits logiques programmables, tels que les microcontrôleurs [43], ou par les réseaux de neurones [44].

La compensation par les réseaux de neurones fait l'étude de la réponse obtenue en vue de concevoir un composant de mesure permettant la correction et la compensation en temps réel

de la réponse. Le rôle assigné à ce composant est de corriger les dérives en température ambiante. En effet il joue le rôle d'un compensateur thermique et il élimine le phénomène de non linéarité afin d'obtenir une réponse unique et linéaire à la vitesse appliquée indépendante de la température ambiante sur une large gamme de fonctionnement.

III. 2. Bruit basse fréquence

L'étude du bruit basse fréquence, ou bruit $1/f$, est une méthode de caractérisation très fine du silicium polycristallin. Un modèle physique a été développé afin d'expliquer l'origine de ce bruit électrique dans ce matériau polycristallin [49]. Le bruit basse fréquence est très intéressant car il permet notamment l'étude de la corrosion chimique de jauges pour capteurs de pression devant travailler en environnements sévères, ainsi que le suivi de la maîtrise des dépôts de silicium polycristallin et de la qualité des contacts électriques aluminium / silicium polycristallin. En effet le niveau de bruit $1/f$ dépend de façon significative de l'atmosphère corrosive comme le montre la figure 56.

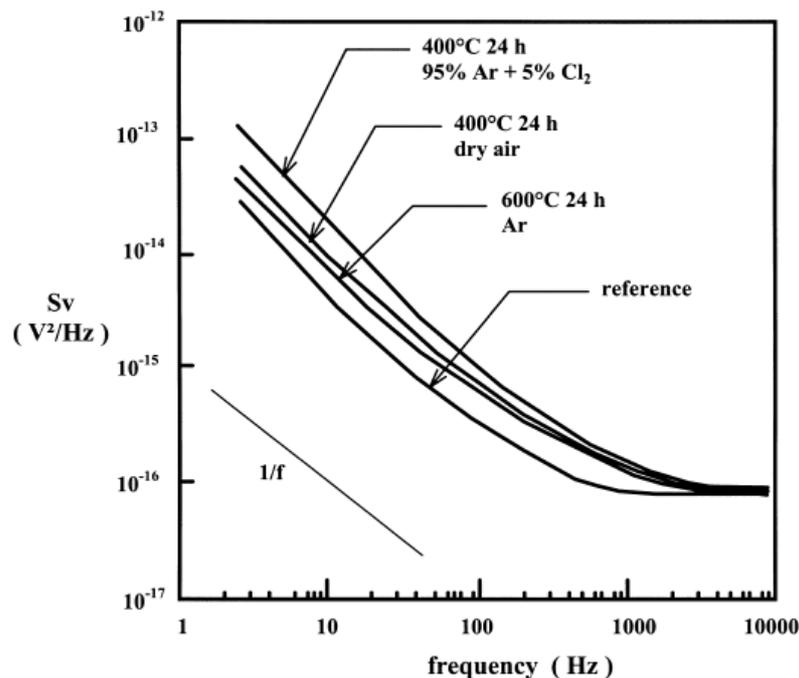


Figure 56 : Les spectres de bruit obtenus pour une jauge piézoélectrique en polysilicium pour différentes atmosphères

III -2- 1 Mesure du bruit 1/f

Etant donnée la structure et la composition interne du capteur en silicium polycristallin, le bruit en 1/f est loin d'être négligeable. La configuration de mesure du bruit est donnée par la figure 57 On utilise un montage à quatre points dont le câblage diffère selon que la résistance du capteur est élevée ou de faible valeur inférieure à 20K Ω .

L'alimentation en courant continu a été réalisée en utilisant des piles à faible bruit de type Cadmium - Nickel. La tension nominale des piles est de 1,2 volts. Par mise en série de piles, on dispose de batteries allant jusqu'à 30 V. Pour certains motifs à très forte résistance, ces batteries ne sont néanmoins pas suffisantes pour permettre une alimentation en courant. On est alors obligé de les alimenter en tension.

a. Alimentation en courant

Cette configuration concerne les motifs à faible valeur de résistance (résistance totale R_0 inférieure à 20 k Ω). On place en série une résistance de forte valeur devant la résistance du motif, assurant ainsi une polarisation en courant.

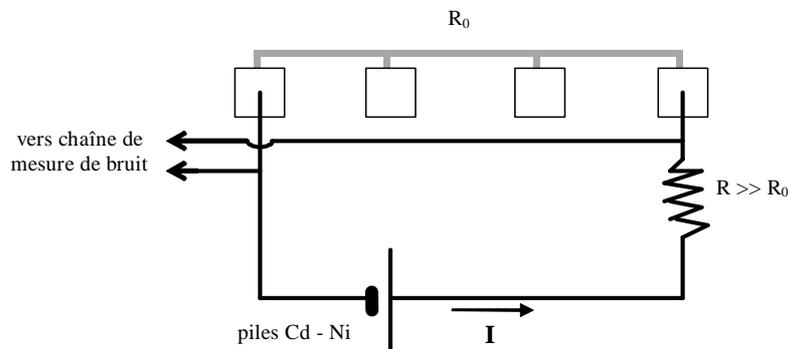


Figure 57.a : Mesure du bruit pour de faible résistance

b. Alimentation en tension

Pour les motifs à forte résistance (résistance totale du motif R_0 supérieure à 20 k Ω), une alimentation en tension est choisie préférentiellement, en plaçant en série avec les batteries une résistance de faible valeur devant R_0 .

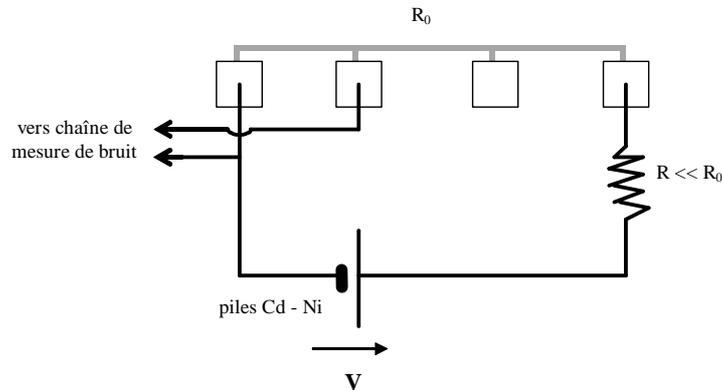


Figure 57.b : Mesure du bruit pour de forte résistance

III- 2- 2 La chaîne de mesure de bruit

La chaîne de mesure de bruit comporte un amplificateur faible bruit et un analyseur de spectre. L'analyseur de spectre est de type Takeda Riken 9405A. Il est relié par une liaison IEEE à un ordinateur permettant l'acquisition et le tracé des données.

Etant donné que les quatre électrodes sont des motifs identiques et symétriques, on s'affranchit du bruit de contact grâce à de telles formes. Pour vérifier si tous ces motifs assurent le même contact électrique, il suffit de comparer les deux spectres de bruit obtenus respectivement lorsque le film de silicium est alimenté dans un sens, puis dans l'autre. Si l'un des contacts est bruyant, les deux spectres seront décalés l'un par rapport à l'autre.

III- 2- 3 Modélisation du bruit 1/f

De nombreux modèles existent afin de modéliser le bruit 1/f dans le silicium polycristallin [45-48]. Néanmoins, ces modèles sont spécifiques à certains niveaux de dopage et type de dopants, et ne peuvent pas être appliqués à du silicium polycristallin fortement dopé au bore. On propose dans ce paragraphe le modèle L. Michelutti expliquant l'origine physique du bruit 1/f en se basant sur des considérations énergétiques.

Dans les films minces de silicium polycristallin, il y a deux sources de dissipation : la dissipation par effet Joule, et les pertes diélectriques. La dissipation par effet Joule a lieu principalement dans le volume des grains, alors que les pertes diélectriques ont lieu dans les joints de grains.

a. Schéma électrique dynamique équivalent

Du point de vue statique, un joint de grain est une mince barrière diélectrique qui peut facilement être traversée par effet tunnel. Le comportement dynamique, lui, est relativement différent du fait du faible niveau des fluctuations de tension alternative mis en jeu, ce qui est le cas pour le bruit électrique. A ces niveaux, et en régime alternatif, le matériau diélectrique présent dans les joints de grains peut présenter une hystérésis. La dissipation diélectrique aux joints de grains est liée à la présence de particules ionisées piégées à ces joints de grains.

On peut obtenir un schéma électrique équivalent vis à vis des fluctuations lors du transport électrique de charges électriques.

L'intérieur du grain peut être représenté par une résistance R_v . Sa valeur peut être déduite de la résistivité de silicium monocristallin de même dopage. Cette résistance conduit à du bruit thermique blanc. Connectée en série avec R_v , une capacité peut être utilisée pour symboliser la barrière diélectrique. Cette capacité C présente, une résistance de fuite R placée en parallèle, afin de représenter la dissipation par effet Joule à l'intérieur du matériau diélectrique du joint de grain. On peut représenter les pertes diélectriques par une résistance \mathfrak{R} en parallèle avec la capacité C . Cette résistance, $\mathfrak{R} = \frac{r}{f}$ (avec r en $\Omega \cdot s^{-1}$) dépend du niveau de polarisation.

Le schéma général proposé (figure 58) est donc le suivant :

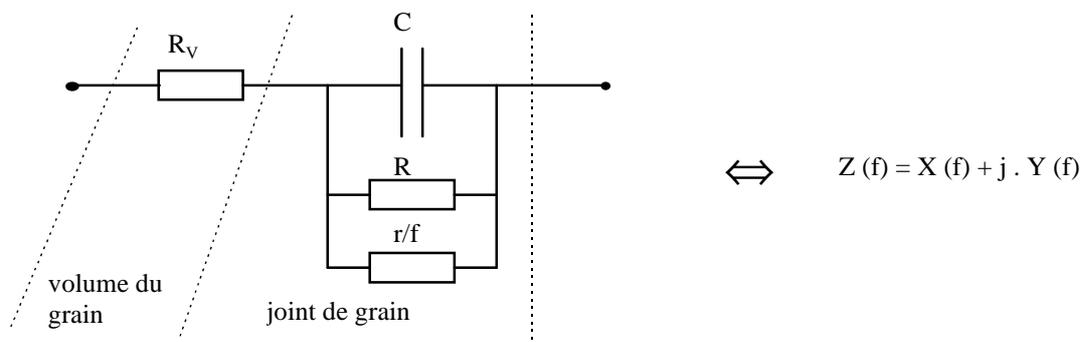


Figure 58 : Le schéma électrique équivalent

b. Densité spectrale de puissance du bruit

Le schéma électrique dynamique équivalent pour le film mince conduit à une impédance Z dont la partie réelle $X(f)$ et la partie imaginaire dépend de la fréquence. D'après

le théorème de Nyquist généralisé et le théorème des fluctuations et dissipation, la densité spectrale de puissance de bruit (exprimée en tension) s'écrit alors :

$$S_v(f) = 4kT \cdot X(f) \quad (4.2)$$

où k est la constante de Boltzmann, T la température absolue.

L'expression ne fait intervenir que le terme dissipatif.

Le calcul complet de $X(f)$ mène à l'expression complète de S_v :

$$S_v(f) = 4kT \left[R_v + R \cdot \frac{r}{f} \cdot \frac{R + r/f}{R^2(1 + 4\pi^2 r^2 C^2) + 2R \cdot r/f + (r/f)^2} \right] \quad (4.3)$$

Si, dans le joint de grain, la dissipation par effet Joule est prépondérante devant les pertes diélectriques, c'est à dire si R est négligeable devant r/f , l'équation complète (4.3) peut être simplifiée en l'équation suivante :

$$S_v(f) = 4kT \left[a_0 + a_1 \cdot \frac{1}{f^2} + \dots \right] \quad (4.4)$$

Le bruit résultant consiste donc en du bruit blanc, et du bruit en $1/f^2$.

Dans le cas inverse, c'est à dire si les pertes diélectriques sont prépondérantes ($R \gg r/f$), le développement à l'ordre 2 de l'équation (4.3) donne :

$$S_v(f) = 4kT \left[R_v + \frac{r}{\gamma} \cdot \frac{1}{f} + \frac{r^2(1 - 2/\gamma)}{R \cdot \gamma} \cdot \frac{1}{f^2} + \frac{r^3(4 - 3\gamma)}{R^2 \cdot \gamma^3} \cdot \frac{1}{f^3} + \dots \right] \quad (4.5)$$

avec $\gamma = 1 + 4\pi^2 r^2 C^2$.

Ceci montre que la dissipation par hystérésis conduit à un spectre de bruit basse fréquence en $1/f$.

III-2- 4 Résultat de la mesure du bruit

D'après les mesures effectuées sur les différents échantillons, la densité spectrale de bruit croît avec la température et l'intensité du courant de polarisation, mais elle décroît avec la fréquence des fluctuations de courant. La figure 59 illustre les densités spectrales de bruit obtenues

Deux types de bruit sont importants dans notre capteur. Le bruit thermique (bruit blanc) et le bruit $1/f$.

Le bruit thermique est dû au chauffage de l'élément sensible par un courant électrique et il dépend de la résistance défini précédemment et la température mais non de la fréquence. La densité spectrale moyenne de ce bruit dans une bande de fréquence Δf est donnée par la relation de Johnson [46] :

$$S_j = 4K_B T R \Delta f \quad (4.6)$$

Avec K_B : constante de Boltzman

T : Température du fil en °K

D'après la figure 46, Le bruit dominant aux fréquences basses est le bruit $1/f$, alors que c'est le bruit blanc qui domine aux fréquences supérieures.

Le courant du bruit thermique mesuré à courant de polarisation 0A est $10^{-11} \text{ A/Hz}^{1/2}$.

Le bruit $1/f$ est dû aux pertes diélectriques dans les joints de grains du polysilicium du fil chaud de l'anémomètre.

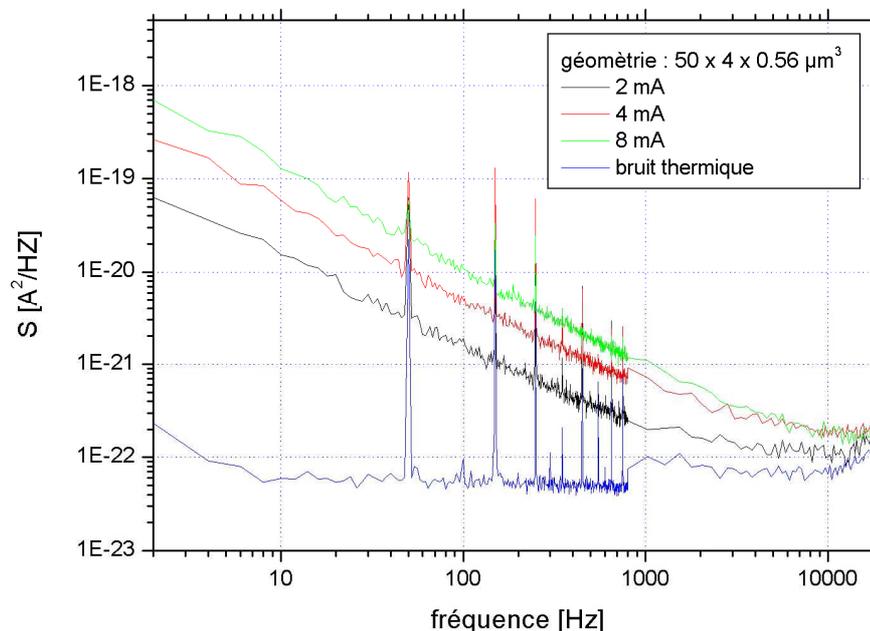


Figure 59.1 : Mesure du bruit du capteur H15

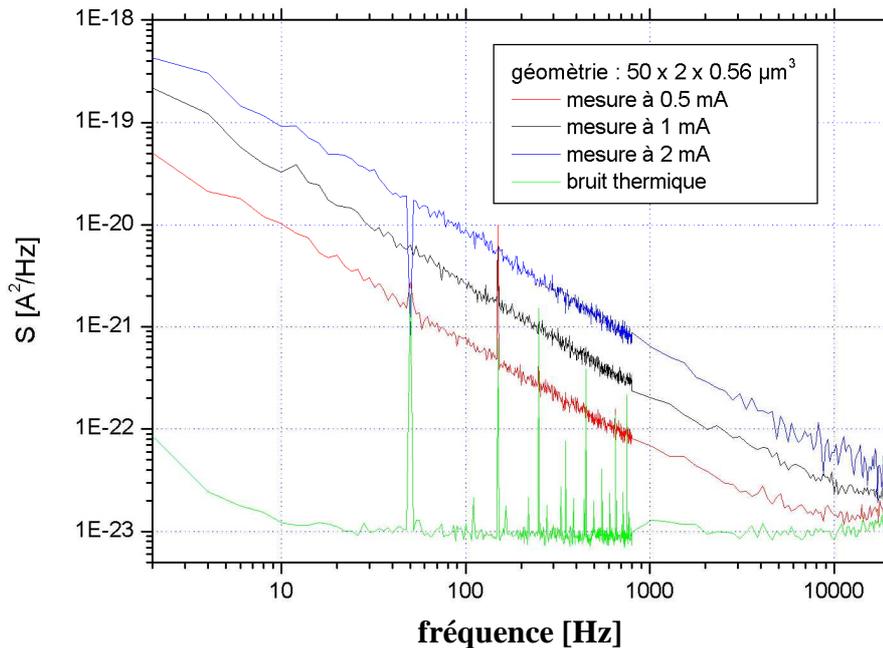


Figure 59.2 : Mesure du bruit du capteur H18

III- 3 Influence de la Corrosion chimique

Dans le domaine de l'avionique, les anémomètres sont souvent soumis à des températures de l'ordre de $200^\circ C$ ou plus (par exemple jusqu'à $650^\circ C$ près des turbines de moteur), et à des atmosphères corrosives dues à l'évaporation de solvants chlorés [49,50]. Des expériences ont été menées sur nos capteurs anémométriques afin de déterminer si les environnements sévères rencontrés en avionique peuvent dégrader la réponse et la durée de vie de ces capteurs.

III -3- 1 Réalisation des échantillons corrodés

L'objet de l'expérience était d'étudier la corrosion du capteur à fil chaud. Les motifs de caractérisation électrique à quatre contacts ont ensuite été réalisés, et aucune couche de passivation n'a été déposée avant le dépôt du film d'aluminium pour la réalisation des plots de contact, afin de permettre une éventuelle corrosion du silicium polycristallin. Les échantillons sont alors soumis à la corrosion.

III -3- 2 Test de corrosion chimique

Les environnements sévères qui peuvent exister en avionique ont été reproduits lors d'expériences de corrosion accélérée à 400 et 600°C. De l'air synthétique sec, ainsi que des mélanges à 5% de dichlore Cl₂ dans l'argon ou l'air synthétique ont été utilisés comme atmosphères corrosives, en régime de circulation établie dans le tube du four de réaction. La pression totale était de 1 bar, et la vitesse des gaz de 0,5 cm/s, ce qui permet d'avoir un flux laminaire dans le tube.

Etant donné que les atmosphères étaient relativement corrosives, il a été nécessaire de vérifier si les échantillons n'étaient pas détruits avant de réaliser la caractérisation électrique. Ceci peut être effectué au microscope optique.

Tous les échantillons corrodés à 600°C n'étaient plus utilisables pour des mesures électriques. Cette température de 600°C était trop élevée pour l'aluminium, qui a commencé à fondre pour tous les échantillons. Comme la durée des expériences de corrosion était longue, les contacts en aluminium ont été détruits, et une migration de l'aluminium dans le silicium (et vice et versa) a été observée.

De plus, quand la corrosion a été réalisée avec 5% de dichlore, une réaction chimique a eu lieu entre l'aluminium et le chlore qui a enlevé l'aluminium des motifs électriques [49]. En conséquence, tous les échantillons de l'expérience corrodés à 600°C ne sont pas présentés dans la suite. Pour les échantillons corrodés à 400°C, l'aluminium a souffert, mais les motifs sont utilisables d'un point de vue électrique. La figure 60 montre la corrosion de l'anémomètre à 600°C.

La présence de chlore est très corrosive pour nos capteurs mais aussi les environnements à hautes températures. Ceci conduit à une dégradation des performances de nos capteurs.

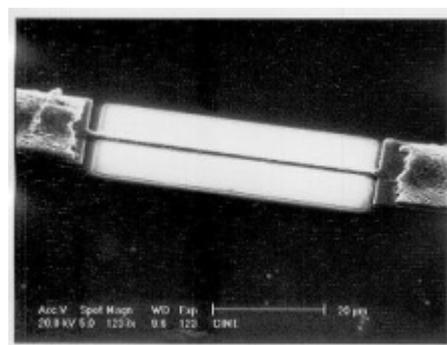


Figure 60 : Corrosion de la microsonde à 600°C

III- 4 L'électromigration

Le phénomène d'électromigration peut apparaître au niveau des métallisations des circuits intégrés quand la densité de courant devient grande. Une température élevée accélère le processus. Quand un courant électrique traverse un conducteur, une certaine quantité de mouvement de ces électrons est transférée aux atomes du conducteur entraînant un mouvement de ces atomes dans la direction du flux d'électrons [6,50].

Au niveau de la zone de contact entre le silicium et la métallisation, il y a migration des atomes d'aluminium ou de silicium. Dans un premier temps, l'aluminium d'une métallisation peut migrer et créer un vide entre cette métallisation et le silicium. A terme, ce mode de dégradation peut engendrer la rupture de la métallisation et donc l'ouverture du circuit. Selon le sens du courant, l'électromigration peut se produire dans l'autre sens : l'échange de quantité de mouvement entre les atomes de silicium et les électrons peut provoquer la migration d'atomes de silicium dans la métallisation en aluminium. Par un effet de réaction inverse, l'aluminium migre dans le silicium. Ce phénomène crée des "spikes" d'aluminium qui, au fur et à mesure, se développent de plus en plus profondément dans le silicium, jusqu'à former un court-circuit.

Le taux de défaillance dû à l'électromigration de contact est évalué en soumettant le composant à un fort courant et une température élevée et constante.

La figure 61 montre migration d'atomes d'aluminium d'électrodes vers le polysilicium du fil chaud de l'anémomètre.

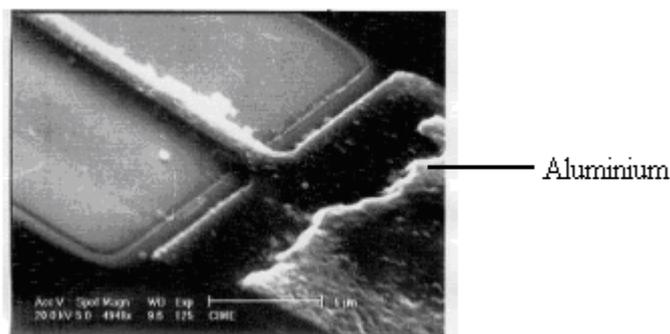


Figure 61 : Phénomène d'électromigration

Conclusion

Conclusion :

La connaissance et la maîtrise des paramètres géométriques des propriétés mécaniques et électriques des matériaux utilisés, ainsi que les mécanismes de défaillances liées aux types de technologie sont des facteurs indicatifs pour l'étude de la fiabilité.

Les défauts de fabrication observés pendant la réalisation de notre capteur anémométrique se situent essentiellement dans l'étape de la libération du fil chaud à polysilicium après la gravure humide, et quand le capteur opère dans un environnement humide. Les principaux défauts de fabrication sont le collage et la présence des résidus de résine dans la cavité du capteur. Certaines précautions peuvent réduire ces problèmes : minimiser la force de capillarité du liquide de rinçage, réduire les surfaces de contact entre le fil chaud et le substrat.

On a pu observer le vieillissement de notre capteur sans avoir à passer par l'observation des structures, ainsi la détection d'une chute anormale de sa résistance maximale permet d'identifier le vieillissement du capteur.

L'observation de notre capteur sous différentes contraintes environnementales (corrosion chimique, humidité..) a permis de mettre en évidence sa grande robustesse. Aucune défaillance majeure n'a été observée. Le paramètre important qui mène à la corrosion du capteur est l'augmentation de la température qui conduit à un circuit ouvert.

Deux types de bruit sont importants dans notre capteur. Le bruit thermique du au chauffage de l'élément sensible par effet Joule et le bruit 1/f du aux pertes diélectriques dans le fil en polysilicium

L'analyse complète de la fiabilité d'un microsystème s'avérait longue et difficile ce qui nous amène à penser que lorsque les mécanismes de défaillance seront mieux connus, il sera nécessaire de développer des modèles qui permettront de simuler le comportement d'un système en fonction des contraintes appliquées. Et il sera intéressant d'optimiser les paramètres géométriques des MEMS permettant d'augmenter la durée de vie des microsystèmes.

Les difficultés à résoudre pour les microsystèmes sont principalement dans le domaine d'encapsulation. Le microcapteur est amené à travailler en environnement sévère avec des températures relativement hautes, atmosphères humides et corrosives d'où la nécessité d'encapsulation en utilisant des matériaux innovateurs résistants.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Ellis Meng, MEMS Technology and devices for a micro fluid dosing system, Thesis of doctorate, California Institute of Technology, (2003).
- [2] L. Michelutti, A. Chovet, J. Stoemenos, J.M. Terrot, M.A. Ionescu, Polycrystalline silicon thin films for microsystems: correlation between technological parameters, film structure and electrical properties, *Thin Solid Films*, 401, 235–242, (2001).
- [3] M. Laghrouche , A. Adane, J. Boussey, S. Ameer , D. Meunier, S. Tardu, A miniature silicon hot wire sensor for automatic wind speed measurements, *Renewable Energie*, 30,1-16, (2005).
- [4] J.Chen, J. Zou, and C.Liu, A review of MEMS fabrication technologies, *J.Chinese So Mech. Eng.*, 22:459-475, (2001).
- [5] Fukang Jiang, Yu-Chong Tai, Theoretical and experimental studies of micromachined hot wire anemometers, USA
- [6] Brian Stark, MEMS Reliability Assurance Guidelines for Space Applications, JPL Publication 99-1, California Institute of Technology, (1999).
- [7] Aboubacar CHAEHOI Conception et modélisation de MEMS monolithiques CMOS en technologie FSBM : application aux accéléromètres, Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, (2005).
- [8] P. J. French, Polysilicon: a versatile material for microsystems, *Sensors and Actuators A* 99, 3-12, (2002).
- [9] Marc J. Madou, MEMS Fabrication, *The MEMS Handbook*, (2002).
- [10] Christian A. Zorman, Mehran Mehregany, *Materials for Microelectromechanical Systems*, *The MEMS Handbook*, (2002).
- [11] Olivier Millet, Fiabilité des microstructures en polysilicium : création de bancs de test in situ. 16^{ème} Congrès Français de Mécanique, (2003).
- [12] Muriel Dardalhon, Contribution à l'analyse de la fiabilité de microsystèmes, Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, (2003).
- [13] Nadim Maluf, Kirt Williams, *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*, Second Edition, (2004)
- [14] Z. Bendekovic, P. Biljanovic, D. Grgec. Polysilicon Temperature Sensor, 362-366, (1998).
- [15] Kyungho Lee, Hyunsoon Kang, Optimisation of boron doped polysilicon resistors, 659-661, Samsung Electronics Korea.

- [16] J.E Suarez, B.E. Johnson, B. El Kareh, Thermal stability of polysilicon resistors, *IEEE*, 537-543, (1991).
- [17] N.William, Jr.Sharpe, Mechanical Properties of MEMS Materials, *The MEMS Handbook*, Johns Hopkins University; (2002)
- [18] Florian Sella, Xavier, Moghrabi. La fabrication des écrans à cristaux liquides à matrice active, Ecole des mines d'Albi, (2002).
- [19] S Maifi, Etude d'une structure électronique de type M-I-I-S à partir de substrat de Silicium et de dépôts de semiconducteurs transparents : Applications photovoltaïque. Thèse de magister, Université UMMTO, (2007)
- [20] Simon Jeannot, Développement de matériaux déposés par PECVD pour les interconnexions optiques dans les circuits intégrés par une approche caractérisation 'back-end'. Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, (2006).
- [21] Amanda Martinez-Gil, Nanostructuration de surfaces de silicium pour guider la croissance auto-organisée de nanostructures métalliques, Thèse de doctorat, Université Paris-Sud XI, Orsay, (2005).
- [22] Laurent David, Développement de la microscopie thermique à sonde locale pour la détermination de la conductivité thermique de films minces, Thèse de Doctorat, Centre Thermique de Lyon, (2006).
- [23] Jeremy A. Walraven, Kenneth A. Peterson, Paiboon Tangyunyong, MEMS Reliability: Infrastructure, Test Structures, Experiments, and Failure Modes, Failure Analysis, Sandia Report, (2000).
- [24] R. de Reus, C. Christensen, S. Weichel, S. Bouwstra, J. Janting. Reliability of industrial packaging for Microsystems, *Microelectronics Reliability* 38 ,1251-1260, (1998).
- [25] Tom lee, Kim Watson, Characterization and reliability of TaN thin film resistors, *Reliability physics IEEE* 502-507, (2004).
- [26] I. Gracia, J.Santander, Result on the reliability of silicon micromachined structures for semiconducteur gas sensors, *Sensors and Actuators, B* 77,409-415, (2001).
- [27] Sylvaine MURATET, Conception, caractérisation et modélisation : Fiabilité prédictive de MEMS à actionnement électrothermique, Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, (2005).
- [28] M. Laghrouche, D. Meunier, J.Boussey, S. Tardu and A. Adane. A Microcontroller Based Wall Shear Stress Measurement. *IEEE*, 121-124, (2004)
- [29] Martin Mischler, Fan-Gang Tseng, Umberto Ulmanella, Chih-Ming Ho. A Micro silicon hot wire anemometer. *IEEE* (1995).

- [30] A. E. Perry, Hot-Wire Anemometry. Oxford University Press, Oxford, U.K, (1982).
- [31] F. MOISY, Méthodes expérimentales en mécanique des fluides, Rapport de stage, Université Paris Sud (2004).
- [32] Fingerson LM. In: Godstein RJ, editor, Thermal anemometers, New York: Hemisphere Publishing, Springer; (1983).
- [33] Mohammad M. Mandurah, Krishna C. Saraswat, A model for conduction in polycrystalline Silicon- Part II: Comparaison of Theory and Experiment. IEEE Transactions on Electron Devices, vol. ED-28, N°10, (1981).
- [34] Korsh G J et Muller R S, Conduction Properties of lightly doped polycrystalline silicon, Solid State Electronics (1978).
- [35] Dinesh Prasad Joshi and Ram Sahai Srivastava, A model of electrical conduction in polycrystalline silicon, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. ED-31, N°7, (1984).
- [36] Huang. R.-S. and C.-H. Cheng, Electrical Measurements on Ion-Implanted LPCVD polycrystalline silicon films, Solid State Electronics Vol. 26, N° 7, 657-665, (1983)
- [37] John Y. W. Seto ,The electrical Properties of polycrystalline silicon films, Journal Appl. Phys., Vol. 46, N° 12, (1975).
- [38] M. Ada hanifi, J. M. Dusseau, A model of conduction in polycrystalline silicon films Amrican Institut of Physics (1987).
- [39] Linan Jiang, Micromachined polycrystalline thin film temperature sensors, IOP Publishing Ltd (1999).
- [40] M.Nakabayashi, H. Ohyama, Model for the radiation degradation of polycrystalline silicon films, IEEE Transactions On Nuclear Science, Vol.50, N°6, (2003).
- [41] Idjeri Boussad. Modélisation d'un micro-capteur anémométrique par les réseaux de neurones, Thèse de Magistère, UMMTO, (2008).
- [42] Bremhorst.K, Effect of fluid temperature on hot-wire anemometers and an improved method of temperature compensation and linearization without use of small signal sensitivities J. Phys. E: Scii. Instrum. 18, 44-9, (1985).
- [43] Paul T. Kolen, Self-Calibration/Compensation Technique for Microcontroller-Based Sensor Arrays, IEE transaction on instrumentation and measurement, 4,620-623, (1994).
- [44] A. AL-Salaymeh, M.S Ashhab, Modellig of a novel hot-wire thermal flow sensor with neural nets under different operating conditions, 7-14, Renewable Energie (2005).
- [45] Luo M.-Y. and G. Bosman, An analytical model for 1/f noise in polycrystalline silicon thin films , IEEE Transactions on Electron Devices, vol 37 n°3, 768-774, (1990)

- [46] Yu Xiao-mei, Jiang Xing-liu, Noise and sensitivity in polysilicon piezoresistive cantilevers, Vol 10 N°10, (2001).
- [47] H. C. de Graaff , M. T. M. Huybers, $1/f$ noise in polycrystalline silicon resistors, J Appl Phys 54 (5),(1983)
- [48] L. Michelutti, $1/f$ noise in polycrystalline silicon thin films, Physical Review B, vol 57 n°19, 12360-12363, (1998)
- [49] L. Michelutti, N. Mathieu, A. Chovet, A. Galerie, Influence of chemical corrosion on resistivity and $1/f$ noise of polysilicon gauges, Microelectronics Reliability, 40, 179-183, (2000)
- [50] Failure Mechanisms, RENESAS. Rev., 83 of 410, (2006).