

## **INTRODUCTION :**

Nous allons présenter dans ce dernier chapitre l'ensemble des opérations technologiques nécessaires pour la fabrication du microlevier piézorésistif que nous avons conçu.

Nous commencerons par détailler les procédés technologiques utilisés pour la réalisation des microsystèmes. Ces procédés sont issus de techniques et d'étapes de fabrication conventionnelles de la microélectronique (semiconducteurs).

A ces procédés viennent s'ajouter des techniques spécifiques telles que les micro-usinages afin de réaliser des structures de différentes formes, la technique d'alignement double face afin d'aligner les motifs d'une face par rapport à celle des autres.

Nous terminerons ce chapitre par l'exposition des principales étapes technologique permettant la fabrication du microlevier piézorésistif.

### **IV.1. Généralités :**

#### **IV.1.1. Choix du matériau utilisé :**

Quand on évoque les techniques de fabrication collective en microélectronique et en microtechnologie, on pense invariablement au silicium même si de récentes études ont montré que des matériaux III-V peuvent être utilisés pour la fabrication d'accéléromètres à détection piézorésistive [71]. Pour l'élaboration de piézorésistances, le silicium peut être utilisé sous forme polycristalline ou monocristalline. Dans notre cas nous avons choisi d'utiliser le silicium monocristallin.

##### **- Silicium monocristallin :**

Le silicium monocristallin est le matériau de choix pour l'élaboration de piézorésistances extrêmement sensibles. C'est d'ailleurs ce matériau qui a été retenu pour la fabrication des premiers microleviers piézorésistifs utilisés pour la microscopie à force atomique [58]. Nous ne reviendrons pas sur les propriétés mécaniques remarquables du silicium monocristallin (**Voir annexe B**) et sur le fait que son utilisation permet d'intégrer des fonctions électroniques sur le même substrat.

### IV.1.2. Substrat de départ :

Le matériau utilisé pour la fabrication du microlevier doit pouvoir supporter une gravure face arrière à la fin de la fabrication afin de permettre la libération du microlevier. Le matériau répondant au mieux à ce critère est le SOI (Silicon On Insulator). Ce matériau est constitué de deux couches de silicium monocristallin séparées par une couche d'oxyde de silicium dont l'épaisseur varie en général avec l'épaisseur du silicium monocristallin en surface. Cette couche joue le rôle de couche d'arrêt lors de la gravure chimique en face arrière.

L'inconvénient majeur d'utiliser un substrat SOI est le prix de revient du substrat mais c'est actuellement la seule solution permettant de fabriquer des microleviers piézorésistifs en silicium monocristallin avec de très faibles épaisseurs [25].

La figure IV.1 représente une coupe de substrat SOI.

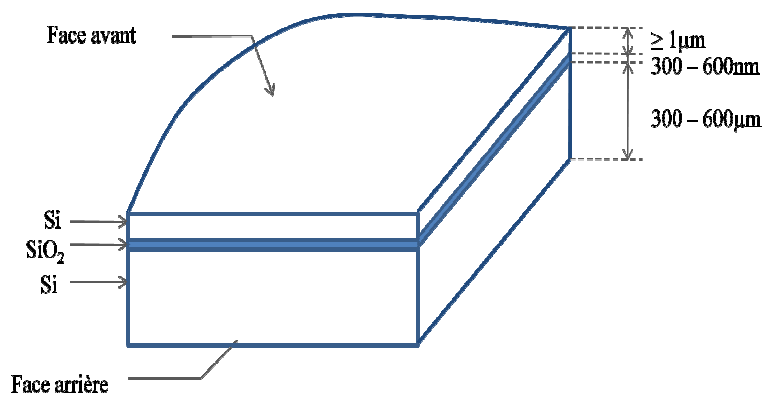


Figure IV.1 : Le SOI

L'épaisseur de la partie haute du substrat SOI donnera directement l'épaisseur finale du microlevier. Lors d'une contrainte du microlevier, les efforts sont maximums à la surface. Ceci impose que la résistance se trouve en surface pour obtenir la meilleure sensibilité possible. Ce qui implique que la profondeur de jonction ne devra pas excéder le tiers de l'épaisseur totale du microlevier. Cette condition sur l'épaisseur de la couche résistive impose d'utiliser l'implantation ionique pour fabriquer la piézorésistance.

### IV.2. Techniques de fabrication :

Les techniques de fabrication mises en œuvre dépendent du choix de conception des microstructures. Pour l'application de type microscopie à force atomique que nous développons dans notre mémoire, nous devons réaliser des microleviers à détection piézorésistive dont une

extrémité est libre et l'autre encastrée. L'optimisation de la détection est réalisée en plaçant cette résistance à la surface du levier et au niveau de l'encastrement de celui-ci avec son support car c'est à cet endroit que la contrainte est maximale lors d'une déflexion.

#### **IV.2.1. Implantation ionique :**

Cette méthode consiste à implanter directement des ions à l'intérieur du matériau par bombardement ionique dont l'énergie est maîtrisée (quelque dizaines de kilo électronvolts). Lors de leur pénétration, les ions perdent progressivement leur énergie par interaction avec les atomes du matériau et finissent par s'immobiliser.

La technique d'implantation ionique permet une meilleure précision et un dopage plus uniforme en surface et en profondeur.

Après cette technique, un recuit thermique de l'objet est indispensable pour recristalliser le substrat afin qu'il retrouve ses propriétés électriques initiales.

#### **IV.2.2. Recuits thermiques :**

Après implantation ionique, un recuit thermique du matériau est indispensable pour d'une part, activer électriquement les impuretés dopantes en les plaçant en position substitutionnelle et d'autre part, réduire voire supprimer les défauts ponctuels.

En effet, du fait du bombardement de la cible par les ions lors des chocs, l'énergie transférée induit des déplacements d'atomes qui créent des lacunes et des interstitiels. Ces défauts répartis tant en surface qu'en volume dégradent les propriétés électriques des jonctions réalisées ainsi que leur stabilité. Un recuit thermique permettra de réduire fortement la densité de ces défauts.

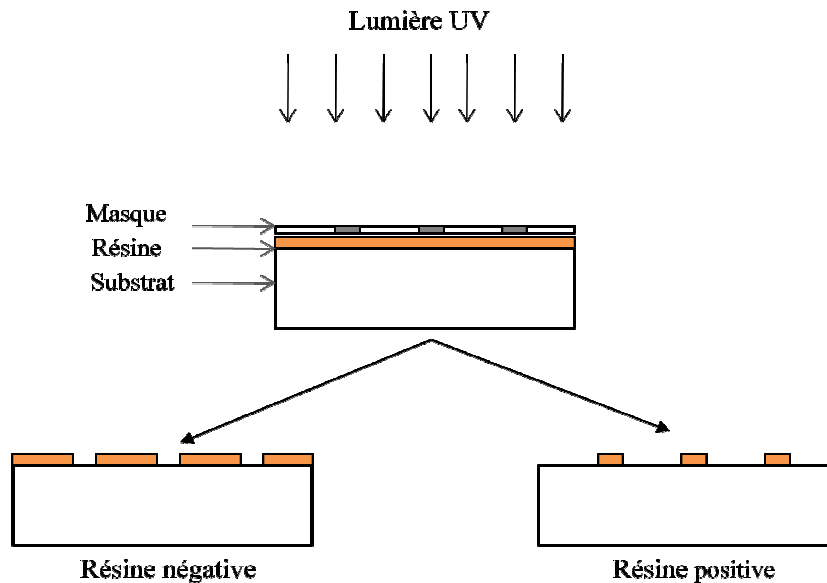
#### **IV.2.3. Photolithographie :**

Toutes les étapes du procédé technologique font appel à la photolithographie dont nous allons rappeler le principe

La photolithographie concerne le transfert le motif du microlevier sur la plaquette par lithographie UV de la résine déposée sur la surface du  $\text{SiO}_2$ . Le transfert du motif est réalisé à partir d'un masque constitué d'une plaque de verre recouvert partiellement de chrome aux endroits où l'on veut empêcher le passage de la lumière UV.

Selon la composition de la résine, il y a deux comportements possibles quand on les expose à un rayonnement de photons émettant dans la gamme des ultra-violets. Une résine est dite positive si elle est sensible aux photons UV, d'où une solubilité accrue des zones exposées

dans le révélateur. Elle est dite négative si les parties soumises aux photons UV se réticulent et deviennent alors insolubles dans le solvant.



*Figure IV. 2. Procédé de lithographie*

La résine photosensible visqueuse après son étalement sur l'échantillon, est alors durcie dans un four, de façon à pouvoir manipuler la plaquette sur une machine d'alignement de masques.

#### **IV.2.4. Techniques de micro-usinage :**

Les procédés de micro-usinage utilisés pour la fabrication des microsystèmes peuvent être classés en deux catégories :

- Le micro-usinage en volume (bulk micromachining) ;
- Le micro-usinage en surface (surface micromachining) ;

##### **IV.2.4.1. Micro-usinage de volume :**

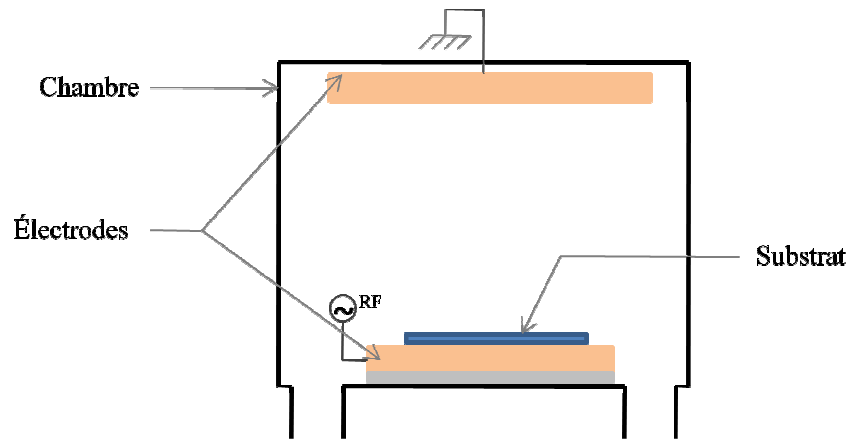
Le micro-usinage en volume représente un ensemble de techniques de gravure qui, en association avec l'utilisation de couches minces de masquage ou des couches d'arrêt, permettent de fabriquer des microstructures à partir d'un substrat de silicium. La gravure du silicium peut être :

##### **a- Sèche :**

Elle est réalisée, généralement, en utilisant les plasmas.

- **Gravure au plasma :**

Le substrat (partiellement protégé) est positionnée dans une chambre sous vide. Cette chambre contient deux électrodes, l'une horizontales servant de plateau pour le substrat et l'autre parallèle à cette dernière et reliée à la masse. Une fois que le vide dans la chambre a été fait, un gaz est introduit : dioxygène (O<sub>2</sub>), Argon (Ar), puis un fort champ électrique (une centaine ou plus de Watt par mètres) en radio-fréquence est appliqué à l'électrode inférieure, générant dans la chambre un plasma, c'est-à-dire un gaz en partie ionisé (certains électrons des molécules de gaz ont été arrachés par le champ électrique, ionisant celles-ci). Le substrat subit alors un bombardement d'ions qui va interagir avec ce dernier.



*Figure IV.3 : Schéma d'une chambre utilisée pour la gravure au plasma*

Cette technique présente l'avantage d'une forte anisotropie de la gravure : la frontière entre les zones gravés et non gravés sera la majorité du temps rectiligne et verticale.

Cependant cette technique présente de nombreux inconvénients :

- La mise en œuvre est bien plus complexe que pour une gravure chimique humide, et difficilement utilisable dans l'industrie.
- Le taux de gravure est assez faible, ce qui allonge le processus de gravure ce qui augmente les chances de détruire la couche protectrice.
- Enfin, le bombardement d'ions endommage fortement la surface, réduisant ses caractéristiques électriques (il est cependant envisageable dans le cas du silicium de faire «recuire» ce dernier reconstituant ainsi le réseau cristallin, mais il est impossible de le faire pour des semi-conducteurs composites, qui se dissocient à température élevée).

- **Gravure ionique réactive :**

La gravure ionique réactive (fréquemment désignée par son acronyme anglais **RIE** pour *Reactive Ion Etching*) est une technique dérivée de la gravure au plasma. C'est aussi une technique de gravure fortement physique (gravure au plasma) auquel on ajoute une gravure chimique sèche.

Concrètement la mise en œuvre est comparable à la gravure au plasma, du moins pour sa forme la plus simple (système à plaques parallèles) : dans une chambre contenant deux électrodes on fait le vide, puis on injecte un gaz qui sera ionisé, bombardant ainsi la surface du substrat. Cependant à ce gaz assez inerte (chimiquement), on ajoute un gaz fortement réactif : généralement un dérivé du fluor (hexafluorure de soufre ( $\text{SF}_6$ ), tétrafluorure de carbone ( $\text{CF}_4$ , ... ) pour des substrats en silicium ou du chlore pour les substrats en arséniure de gallium (trichlorure de bore ( $\text{BCl}_3$ , dichlore ( $\text{Cl}_2$ , tétrachlorure de silicium ( $\text{SiCl}_4$ ), ... ). Ce gaz réactif ionisé va être transporté vers le substrat (par une différence de potentiel dans la chambre auto-crée dans un dispositif à plaques parallèles, un autre champ électrique dans un dispositif à triode, ou alors un champ magnétique dans un dispositif à torche à plasma) et réagir chimiquement avec la surface de ce dernier, formant un composé volatil. Cette technique reste complexe à mettre en œuvre, surtout dans l'industrie.

**b- Humide :**

Elle est accomplie en utilisant des solutions chimiques. Le point commun de ces solutions réside dans la propriété de pouvoir dissoudre le silicium par des enchaînements de réactions d'oxydoréduction et de dissolution des oxydes ainsi formés.

Les deux gravures, humide et sèche peuvent avoir un caractère isotrope ou anisotrope :

- **Gravure isotrope :**

Dans la gravure isotrope, la vitesse d'attaque est approximativement constante dans toutes les directions. Dans ce cas, il est difficile de contrôler avec précision les dimensions latérales des motifs résultants. L'inconvénient majeur de cette technique est la gravure des zones situées sous le masque dans le cas où l'usinage latéral n'est pas souhaité. La figure IV. 4 montre un exemple de motif réalisé par cette technique.

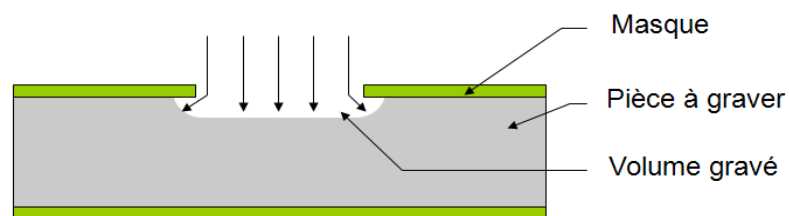
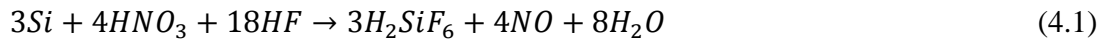


Figure IV.4 : Exemple de cavité obtenue par gravure isotrope [72].

L'attaque chimique utilisée se fait dans une solution contenant HF, HNO<sub>3</sub> et H<sub>2</sub>O (ou CH<sub>3</sub>COOH).

L'acide nitrique et l'acide fluorhydrique servent respectivement à oxyder et à désoxyder la surface du silicium. L'eau et l'acide acétique jouent le rôle de modérateurs. La réaction chimique réagissant la gravure est :



Cette réaction s'effectue à la température ambiante.

Le masquage peut être effectué par une couche d'oxyde de silicium. La gravure des surfaces de SiO<sub>2</sub> réalisée par voie chimique, en buffer HF et la vitesse d'attaque de cette attaque est d'environ 700°A/min. Dans le cas où la gravure du silicium est de longue durée, le masque SiO<sub>2</sub> peut être totalement attaqué. Dans ces conditions, il est préférable d'utiliser des masques en nitrure de silicium.

#### - Gravure anisotrope :

Contrairement aux procédés de gravure humide isotropes avec HF par exemple [73], les gravures anisotropes permettent de contrôler, avec précision, les dimensions des structures micro usinées. Ce type de gravure est généralement réalisé dans des solutions aqueuses anisotropiques. Parmi ces solutions, on peut citer :

- Hydroxyde de potassium KOH.
- Hydrazine N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>.
- Ethylène diamine-pyrocathécol.

Dans ce type de gravure, la vitesse d'attaque des plans (100) est de l'ordre de 100 fois celle des plans (111) (**Figure IV.5**). L'explication généralement donnée de l'anisotropie est que la vitesse de gravure pour un plan donné est déterminée par la densité d'atomes dans ce plan et par le nombre de liaisons Si-Si exposées à la solution ou restant à l'intérieur du matériau [74-75]. On peut donc réaliser des cavités de formes diverses dont les faces sont délimitées par plans cristallographiques donnés.

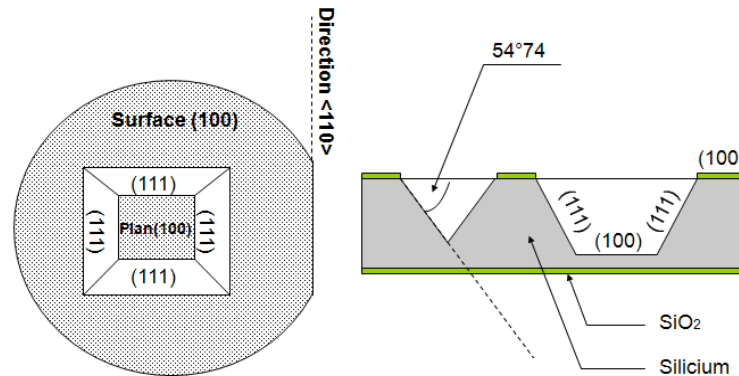


Figure IV.5: Exemple de cavité obtenue par gravure anisotrope [72]

#### IV.2.4.2. Micro-usinage de surface :

Illustré pour la première fois par Nathanson et Wickstrom[76], le concept de « micro-usinage » de surface est, dès 1988, définitivement intégré dans le panel des techniques de base pour la fabrication des microsystèmes[77].

De la même manière que pour le micro-usinage de volume, le procédé décrit ici a, comme point de départ, le substrat de silicium. Cependant, les deux techniques de micro-usinage diffèrent radicalement en cela que :

- Pour la première technique(en volume), le substrat de silicium est lui-même gravé afin de définir les microstructures ;
- Pour la seconde (en surface), le substrat n'est qu'un support en surface duquel une alternance de couches minces est déposée et gravée de manière sélective, avec la même finalité que ci-dessus.

### IV.3. Techniques de fabrication mises en œuvre pour la réalisation du microlevier piézorésistif :

Nous allons à présent décrire précisément les différentes étapes technologiques menant à la réalisation du microlevier piézorésistif. Nous avons choisis pour sa réalisation un substrat SOI de type N, faiblement dopés. Le procédé de fabrication fait intervenir les étapes suivantes :

#### IV.3.1. Nettoyage des plaquettes :

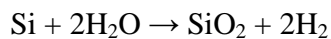
Avant de procéder à l'oxydation des plaquettes de silicium, l'étape préliminaire consiste en un nettoyage standard de surface. Le nettoyage standard repose sur la succession de deux bains chimiques :  $H_2SO_4+H_2O_2$ , puis HF dilué dont les rôles sont respectivement la croissance d'un oxyde chimique très mince et la gravure de cet oxyde en même temps que l'élimination des impuretés de diverses natures à la surface de la plaquette.



### IV.3.2. Réalisation de la pointe :

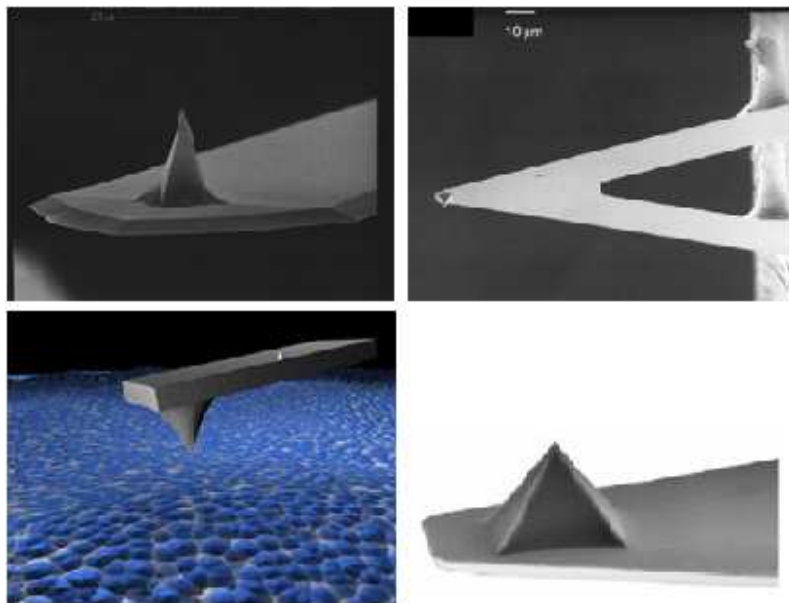
Une fois les plaquettes nettoyées, on fait croître l'oxyde. On forme une couche de silice  $\text{SiO}_2$  à la surface de la plaquette de silicium par oxydation dans un four à haute température (environ  $900^\circ\text{C}$ ) parcouru par un courant gazeux oxydant.

L'oxydation humide est beaucoup plus rapide que l'oxydation sèche (sous  $\text{O}_2$ , uniquement). Le courant d'oxygène est chargé en vapeur d'eau qui réagit avec le Si suivant :



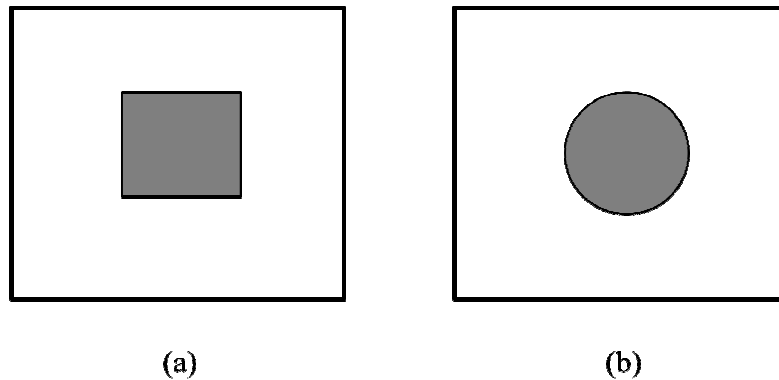
Pour créer la pointe nous pouvons utiliser une gravure humide ou une gravure sèche, ainsi La base de la pointe peut être carrée ou circulaire.

La figure IV.6 présente quelques types de pointes utilisées en microscope à force atomique :



*Figure IV.6: vue de quelques types de pointes par microscopie électronique.*

- Masque pour créer la pointe :



*Figure IV.7: (a) : masque pour créer une pointe carrée, (b) : masque pour créer une pointe circulaire.*

### IV.3.3. Réalisation du microlevier piézorésistif:

Pour la création du microlevier piézorésistif nous avons utilisé cinq étapes de photolithographie [19]:

#### IV.3.3.1. Première photolithographie :

La première photolithographie permettant de faire les ouvertures dans l'oxyde et de définir la forme des jauges. Les jauges de contrainte sont constituées de deux bras, ces deux bras étant reliés à leurs extrémités par un rectangle. Après une étape d'oxydation, le pré-dépôt type P de bore effectué, permettant de former des zones piézorésistives n'est pas réalisé sur toute l'épaisseur du substrat mais seulement en surface jusqu'à une profondeur de gravure liée à la condition de dépôt.

Enfin il faut faire un recuit oxydant pour faciliter la diffusion du bore dans le silicium et la passivation des jauges (**Figure IV.8**). En théorie la valeur de la résistance carrée après le pré-dépôt est avant recuit d'environ  $270\Omega$  et de  $800\Omega$  après le recuit (valeurs simulées sous le logiciel « Sylvaco »). Les mesures donnent des valeurs légèrement inférieures soit  $200\Omega$  avant recuit et  $700\Omega$  après recuit [19].

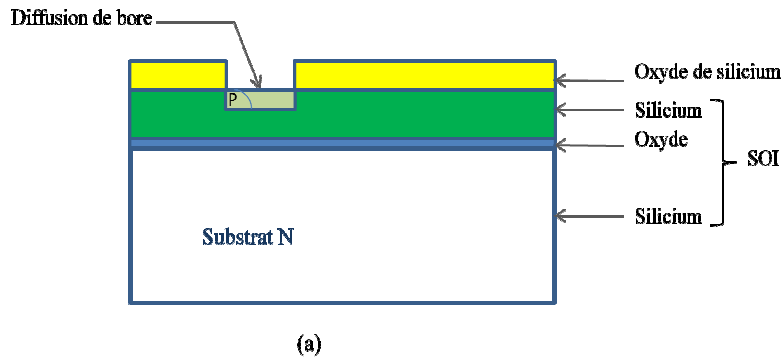


Figure IV.8 : Vue en coupe du procédé technologique : oxydation, ouverture et dopage.

#### IV.3.3.2. Deuxième photolithographie :

Cette deuxième étape de photolithographie crée les ouvertures dans l'oxyde de passivation pour définir les contacts sur les jauges. Après la photolithographie, la gravure des contacts dans l'oxyde est réalisée dans une solution de buffer HF (**Figure IV.9**). Cette étape de gravure est préalablement testée sur une plaque témoin et la fin de la gravure est visible à l'œil nu.

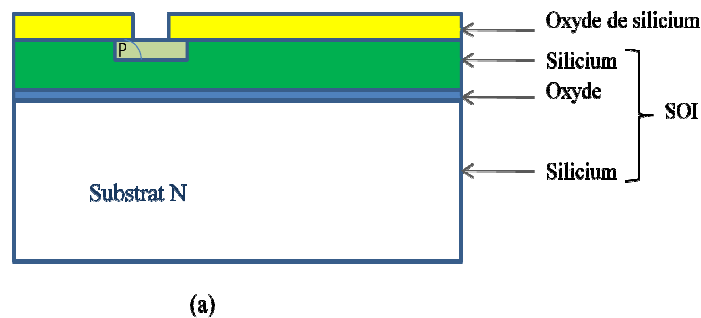


Figure IV.9 : Vue en coupe du procédé : ouverture contacts jauges.

#### IV.3.3.3. Troisième photolithographie :

Cette étape permet de créer le plot de contact pour avoir accès à la piézorésistance. Ainsi, après nettoyage (solvant + acide) une fine couche d'aluminium est déposée par pulvérisation cathodique à température ambiante. La largeur des pistes d'aluminium est fixée par la limite de la largeur des motifs. Après le dépôt, la troisième photolithographie définit la forme des contacts électriques. Enfin un recuit est nécessaire avant la quatrième photolithographie (**Figure IV.10**).

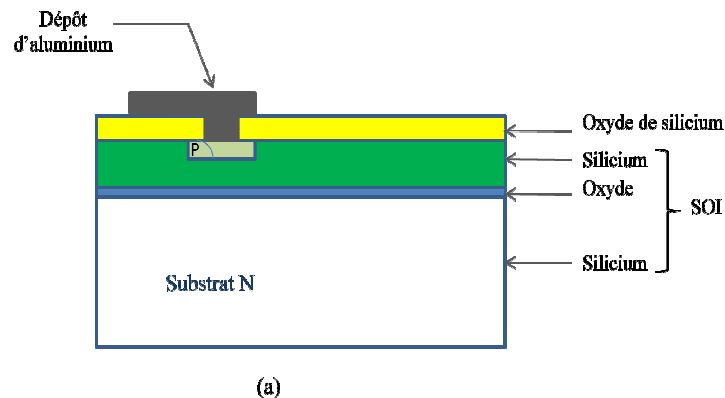


Figure IV.10 : Définition des zones recouvertes d'aluminium.

#### IV.3.3.4. Quatrième photolithographie :

La quatrième étape de photolithographie consiste à réaliser une gravure sèche face avant. Il est maintenant possible de graver de façon anisotrope (ou isotrope) le silicium par voie sèche en utilisant la gravure en DRIE. Cette méthode allie le procédé de dépôt et de gravure plasma. Au fur et à mesure que le silicium est usiné, le procédé permet de déposer un composé fluoré sur les parois usinées, afin de les passiver. Il existe donc des cycles de gravure-dépôt avec des gaz et des temps bien précis pour graver en profondeur et anisotropiquement le silicium indépendamment de son orientation.

Nous avons utilisé une résine pour servir de couche de protection. Avant d'effectuer la gravure, l'oxyde  $\text{SiO}_2$  de passivation doit être retiré de manière à être directement en contact avec le silicium.

Cette étape permet aussi d'enlever l'oxyde situé en face arrière déposé par oxydation thermique lors de la première étape. Enfin, la gravure utilise comme couche d'arrêt l'oxyde du SOI (Figure IV.11).

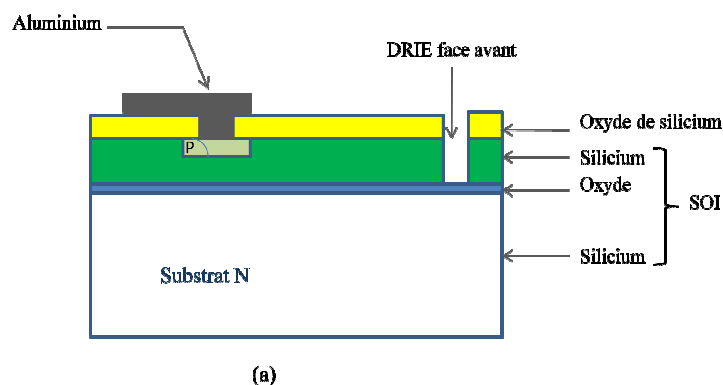
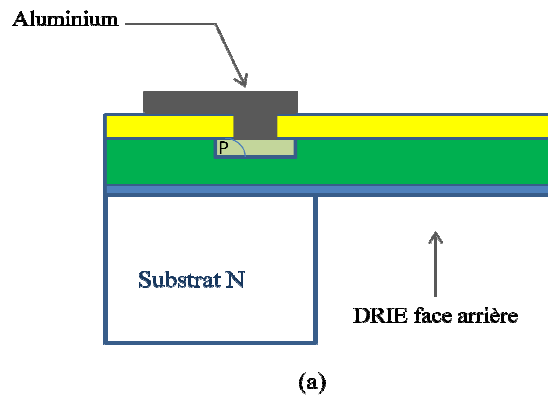


Figure IV.11 : Gravure face avant DRIE.

**IV.3.3.5. Cinquième photolithographie :**

La cinquième étape de photolithographie consiste à réaliser une gravure face arrière, elle nécessite tout d’abord de protéger la face avant avec de la résine qui sert de couche de protection pour la fin de gravure. Nous effectuons un dépôt face arrière par pulvérisation d’aluminium qui va servir de couche de protection pour la gravure profonde du silicium. Nous réalisons alors la cinquième photolithographie avec un alignement double face pour aligner les ouvertures de gravure face arrière avec les géométries face avant. La gravure en DRIE de l’épaisseur complète du substrat est alors faite et s’arrête sur l’oxyde du SOI.

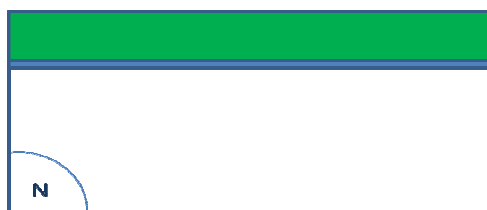
La libération des structures est obtenue en gravant l’oxyde du SOI. Les premiers essais de gravure de l’oxyde ont été réalisés par attaque chimique au Buffer HF, mais les poutres trop contraintes flambaient ce qui eu pour conséquence de trop fragiliser les microstructures. Pour limiter ce phénomène nous avons eu recours à la gravure au plasma RIE de l’oxyde sur la poutre.



*Figure IV.12 : Gravure face arrière : libération des poutres.*

La dernière étape a été la découpe finale des plaquettes en puces.

Les étapes du procédé de fabrication que nous venons d’exposer sont illustrées sur la figure suivante :



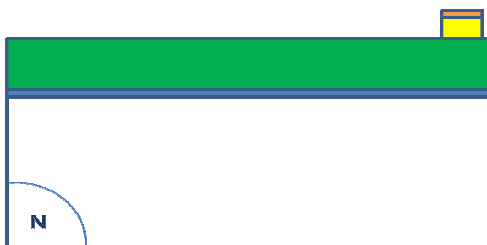
1- Nettoyage de la plaquette.



2- Oxydation de la face avant de la plaquette.



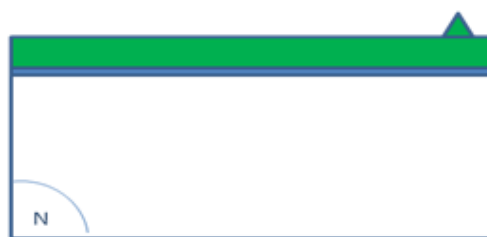
3- Dépôt de la résine sur la couche d'oxyde.



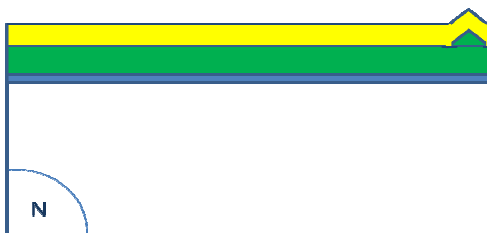
4- Polymérisation de la résine et gravure isotrope du  $\text{SiO}_2$  pour créer l'ouverture d'attaque du Si.



5- Gravure anisotrope du silicium pour créer la pointe.



6- Elimination du masque d'oxyde.



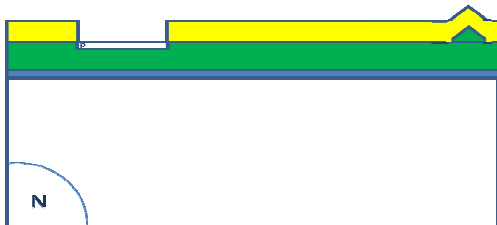
7- Oxydation de la face avant de la plaquette.



8- Application de la résine sur la couche de  $\text{SiO}_2$ .



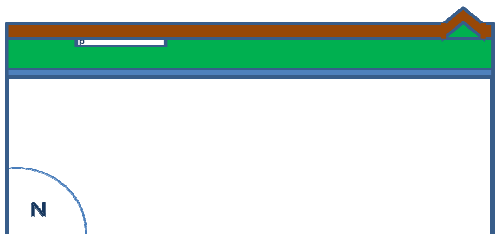
9- Polymérisation de la résine et gravure isotrope du  $\text{SiO}_2$ .



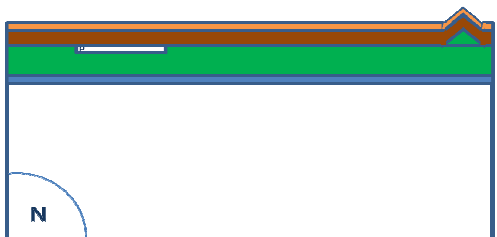
10- Création de piézorésistance par implantation ionique.



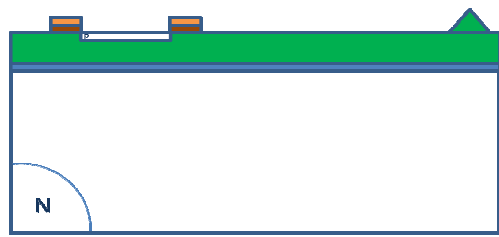
11- Elimination du  $\text{SiO}_2$ .



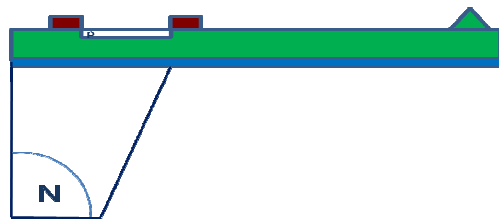
12- Dépôt d'une couche d'Aluminium de la face avant de la plaquette



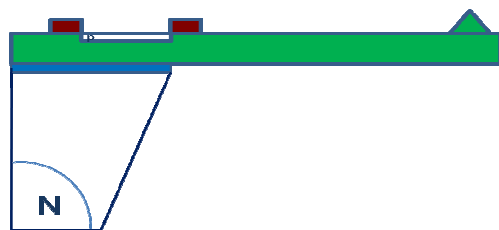
13- Application de la résine.



14- Polymérisation de la résine et gravure de l'Aluminium pour créer les interconnexions.



15- Gravure humide anisotrope de l'épaisseur complète du substrat face arrière et arrêt sur l'oxyde interne du SOI.



16- Suppression de l'oxyde du SOI pour la libération du microlevier.

*Figure IV.13 : Vue en coupe des principales opérations technologiques dédiées à la réalisation du microlevier piézorésistif.*

## Conclusion :

Après avoir présenté quelques généralités sur le silicium monocristallin, nous avons exposé quelques techniques nécessaires à la fabrication des microsystèmes. Ces techniques sont généralement issues des techniques classiques de la microélectronique et de certaines techniques spécifiques telles que la gravure du silicium en vue de la réalisation de microstructures et l'alignement double face afin de pouvoir aligner les motifs d'une face par rapport à ceux de l'autre.

En partant d'un substrat SOI, nous avons décrit les étapes technologiques de fabrication du microlevier piézorésistif.