

Réalisation d'un capteur de pression et caractérisation

5.1 Introduction

Dans cette partie, nous décrivons les différentes étapes mises en œuvre pour la réalisation d'un prototype de capteur de pression. Dans un premier temps nous décrivons brièvement les machines utilisées dans la réalisation des éléments de base de notre composant puis nous décrivons les étapes technologiques ayant permis la réalisation du capteur.

5.2 Réalisation d'un prototype

5.2.1 Présentation du capteur

On cherche à réaliser un capteur dont la fréquence de résonance sous pression ambiante se situe dans la bande ISM (Industrial Scientific Medical), entre 433,05 MHz et 434,79 MHz. Le résonateur à ondes acoustiques de surface est réalisé sur un substrat piézoélectrique de quartz coupe AT et les ondes générées sont des ondes de Rayleigh.

La partie sensible du capteur est une membrane de quartz sur laquelle est déposé le résonateur. La pression différentielle exercée de part et d'autre de la membrane crée une contrainte au niveau du résonateur et en modifie la réponse électrique. La fréquence de résonance du résonateur ainsi que l'amplitude changent de réponse et sont fonction de la pression appliquée sur cette membrane.

Une schématisation du capteur est représentée sur la figure 5.1. Sa dimension est $11 \times 11 \times 0.5 \text{ mm}^3$. Son diamètre de membrane est 8 mm. Les substrats utilisés pour la fabrication sont des cylindres d'un diamètre de 4 pouces. Dans ces conditions, le substrat peut contenir jusqu'à 52 dispositifs identiques dont la répartition est illustrée sur la figure 5.2.

5.2.2 Les machines de microfabrication

5.2.2.1 Tournette

La tournette est une machine qui permet de déposer une couche mince homogène de résine par centrifugation sur un substrat [49]. Les grandes étapes de la réalisation sont :

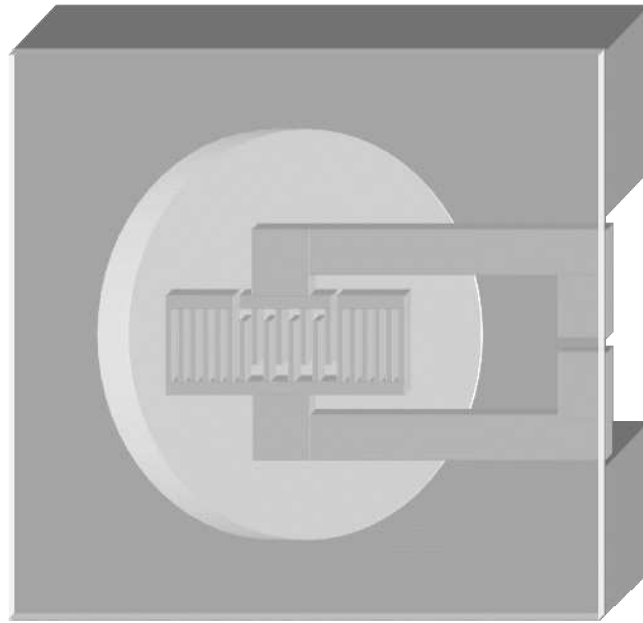


FIGURE 5.1 – Schématisation du capteur de pression

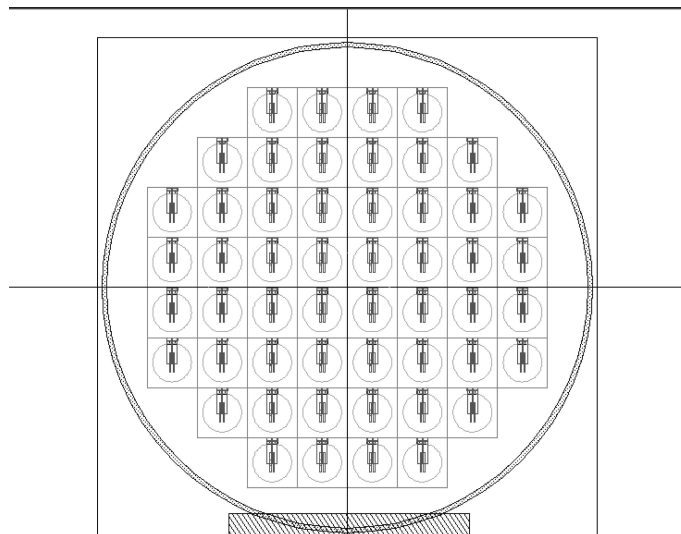


FIGURE 5.2 – Visualisation d'un masque de photolithographie montrant la répartition des capteurs de pression

- Dépôt de la résine sur le substrat
- Accélération de la vitesse angulaire
- Rotation pendant un temps donné
- Évaporation du solvant pendant la rotation

Les épaisseurs de résine déposées sont de taille micrométrique. Après le dépôt de couche mince de résine, la plupart des résines nécessitent d'être polymérisées par chauffage.

5.2.2.2 Aligneur

L'aligneur permet, par insolation ultraviolette de modifier localement les propriétés chimiques

des résines utilisées [50]. Le substrat est recouvert par le masque de verre sur lequel est micro-structuré une architecture en chrome. Les rayons ultraviolets traversent le verre et sont soit réémis par le chrome soit absorbés par la couche photosensible. L'ajout de produit sélectif permet ensuite de solvater la résine insolée (cas de la résine positive) ou non insolée (cas de la résine négative).

5.2.2.3 Machine de dépôt par pulvérisation cathodique

La machine de dépôt à pulvérisation permet de déposer des couches minces métalliques sur un substrat [51]. Le bâti utilisé est un bâti de pulvérisation cathodique Plassys. Le mécanisme est le suivant : on crée d'abord un plasma après avoir généré du vide puis on introduit un gaz que l'on excite électriquement. On procède ensuite au bombardement de la cible de métal que l'on souhaite déposer par les ions du plasma accélérés sous 1 kV environ. Ces ions vont arracher des atomes de la cible qui vont être projetés vers le porte substrat et s'y déposer.

5.2.2.4 Machine de gravure sèche

La gravure sèche est réalisée à l'aide d'une DRIE (Deep Reactive Ion etching) [52]. Elle permet de graver des microstructures dans des substrats en silicium. La gravure sèche est une technique de gravure assisté par plasma dans laquelle interviennent à la fois les effets de bombardement par des ions et une réaction chimique. Le principe du procédé peut se résumer de la manière suivante :

- création du plasma,
- génération dans le plasma d'espèces pouvant attaquer chimiquement la couche,
- transfert des espèces réactives depuis le plasma vers la surface de la couche à graver,
- adsorption de l'espèce corrosive à la surface,
- réaction avec le matériau de surface (le matériau produit par la réaction doit être volatil pour pouvoir quitter la surface),
- désorption du produit de réaction,
- diffusion dans l'environnement gazeux.

5.2.2.5 Évaporation

La technique la plus courante consiste à évaporer le matériau à déposer en le portant à une température suffisante. Le chauffage de la cible est généralement effectué grâce à un canon à électron [53]. Dès que la température de liquéfaction est dépassée, la pression de vapeur saturante du matériau est sensiblement supérieure à celle dans l'enceinte. Des atomes du matériau s'échappent alors et se propagent en ligne droite jusqu'à ce qu'ils rencontrent un obstacle et se condensent.

5.2.2.6 Wafer bonder

Un wafer bonder est une presse dont on peut asservir la pression interne à l'enceinte et la température. Il permet de réaliser sous atmosphère contrôlée un pressage d'un ensemble de substrats afin d'effectuer un collage.

Les collage sont réalisé à température ambiante afin de minimiser les contraintes induites par la température.



FIGURE 5.3 – Photographie de la presse utilisée pour coller des substrats entre eux.

5.2.2.7 Scie

La scie permettant la découpe des substrats est une scie mécanique. La rotation d'une lame permet le découpage progressif du substrat. Un système de refroidissement avec de l'eau est souvent nécessaire afin d'éviter de générer trop de contraintes thermiques dans les substrats et risquer de les casser.

5.2.2.8 Rodage des substrats

Les substrats sont rodés jusqu'à l'obtention de l'épaisseur désirée. Cela permet entre autre de contrôler l'épaisseur de la membrane. L'affinement est réalisé par abrasion mécanique. La vitesse de rodage dépend de la pression exercée sur le substrat, de la taille des grains et de la vitesse de rotation. Au laboratoire, nous disposons de deux rodeuse de technologies différentes.

- La première est une rodeuse simple face, elle permet d'affiner grossièrement un substrat mais crée des inhomogénéité d'épaisseur (TTV) et de planchette (les plan représentant les faces inférieures et supérieures du substrat ne sont plus parallèles). Une photographie de la rodeuse est représentée figure 5.4.
- La rodeuse double face permet non seulement de s'affranchir des problèmes générés par la rodeuse simple face mais également de traiter les substrats en série (jusqu'à cinq substrats à la fois). Une photographie de la rodeuse double face est représentée sur la figue 5.5

Les paramètres utilisés lors du rodage sont les suivant :

- L'abrasif utilisé est du carbure de silicium avec un grain de $9\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre
- La pression appliquée sur les substrats est de 0,1 bar.



FIGURE 5.4 – Photographie de la rodeuse simple face.

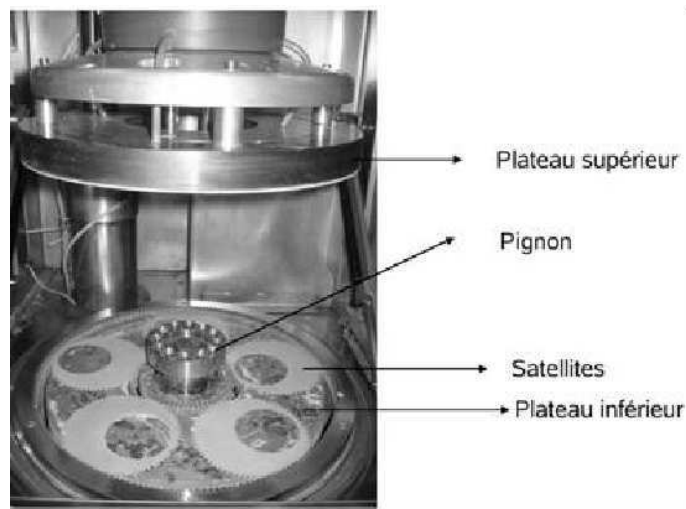


FIGURE 5.5 – Photographie de la rodeuse double face.

- La vitesse de rotation des plateaux est de $100 \text{ tours.min}^{-1}$

Avec ces paramètres, la vitesse de rodage est de $5 \mu\text{m.min}^{-1}$

Les paramètres utilisés lors du polissage sont les suivants :

- L'abrasif utilisé est de la silice colloïdale
- La pression appliquée sur les substrats est de 0,02 bar
- La vitesse de rotation des plateaux est de $100 \text{ tours.min}^{-1}$

5.2.3 Procédé de fabrication

5.2.3.1 Résumé des procédés

L'ensemble des masques a été généré de manière semi-automatique via un programme développé et mis en œuvre dans le logiciel cadence. À partir de simples variables d'entrée, il est possible de modifier les paramètres suivants comme l'illustre la figure 5.6 :

- D est le diamètre de la membrane,
- L la demi longueur totale du résonateur,
- L_1, L_2, L_3 les paramètres pour les pistes de contact électrique,

Les paramètres permettant la caractérisation géométrique du résonateur sont :

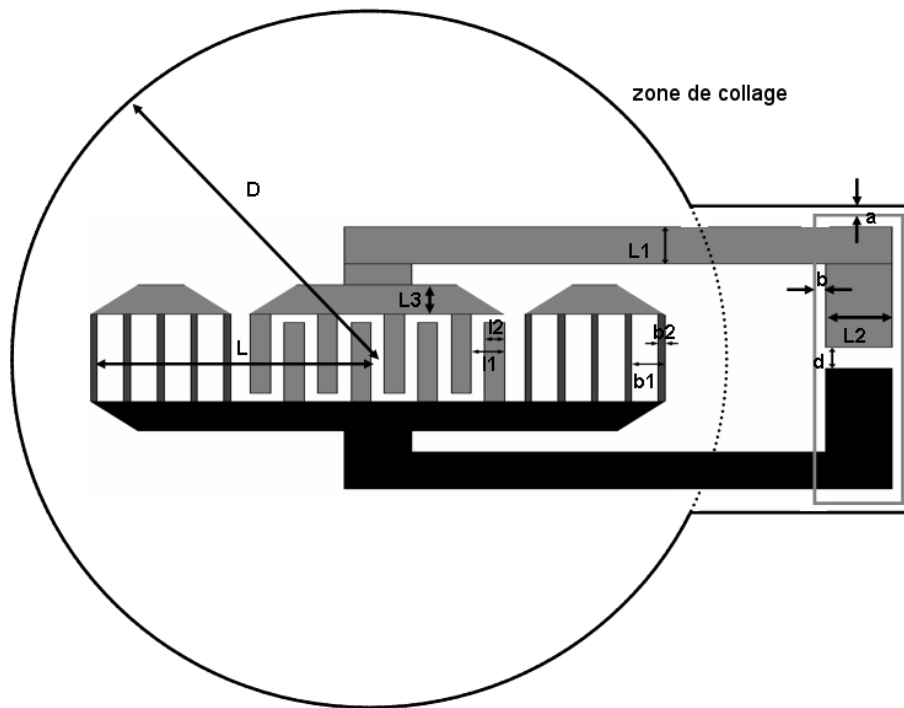


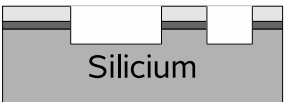
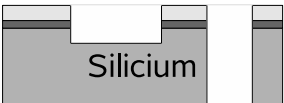
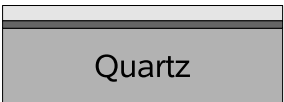
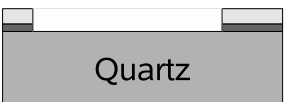
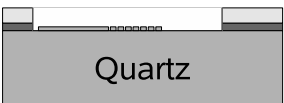
FIGURE 5.6 – Shematisation des différents paramètres géométrique du capteur.

- la distance d séparant le point chaud de la masse permettant de tester les dispositif sous pointe,
- b correspondant à la distance entre la taille du trou de contact et celle des contacts électriques,
- a correspondant à la longueur séparant le trou de contact à l'or que l'on dépose pour permettre le collage des substrat de quartz et silicium.

Pour la série de manipulations à suivre, les paramètres géométriques du capteur sont les suivants :

- la période mécanique est telle que : $l_1 = b_1 = 3.58\mu m$,
- le nombre d'électrode dans chaque miroir de Bragg est de 200,
- le nombre de paires de transducteurs est de 150,
- le taux de métallisation l_2/l_1 est de 0,5 pour les peignes interdigités,
- le taux de métallisation b_1/b_2 est de 0,6 pour les miroirs de Bragg,
- le rayon D est fixé à 4 mm,
- $b=50\mu m$, $d=100\mu m$ et $a=40\mu m$

Toutes les étapes de fabrication du capteur sont chronologiquement détaillées dans le tableau 5.1.

 Silicium	Dépôt de chrome (5 nm) et d'or (150 nm) sur l'ensemble du substrat. Le chrome est utilisé pour améliorer l'adhérence de l'or sur le substrat.
 Silicium	Gravure humide de l'or et du chrome.
 Silicium	Gravure des cavités et des zones de contact.
 Silicium	Gravure débouchante permettant l'accès aux contacts électriques.
 Quartz	Dépôt de chrome et d'or sur le substrat de quartz.
 Quartz	Gravure humide du chrome et de l'or.
 Quartz	Dépôt des résonateur et des contacts électriques (200 nm d'épaisseur).

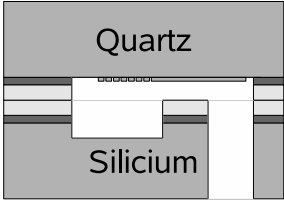
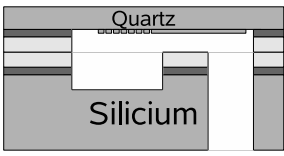
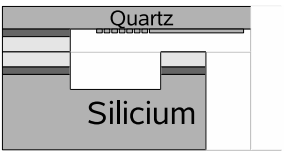
	Collage des substrats de quartz et de chrome (la cavité sous la membrane n'est pas fermée).
	Affinage du substrat de quartz.
	Découpage des capteurs. Les contacts électriques deviennent facilement accessibles.

TABLE 5.1: Liste détaillée des différentes étapes technologiques de microfabrication du capteur de pression.

5.2.3.2 Dépôt chrome/or et gravure humide

La première étape technologique consiste à déposer une couche de chrome et d'or sur les substrats de quartz et de silicium. Cette étape permettra le collage des substrats de quartz et de silicium entre eux. Chacun des substrats est préalablement nettoyé par un bain piranhas (mélange d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène) afin d'éliminer les résidus organiques du substrat [54]. La couche de chrome sert de surface d'adhérence à la couche d'or qui est destinée au collage. Les dépôts métalliques sont réalisés par pulvérisation cathodique. Les paramètres pour la pulvérisation du chrome sont :

- pression de l'enceinte fixée à 7.10^{-3} mbar,
- intensité du générateur fixée à 0,5 A (la vitesse de dépôt du chrome est alors de $524 \text{ Å} \cdot \text{min}^{-1}$).

Les paramètres pour le dépôt de l'or sont :

- pression de l'enceinte fixée à 7.10^{-3} mbar.
- intensité du générateur fixée à 0,6 A (la vitesse de dépôt de l'or est alors de $2100 \text{ Å} \cdot \text{min}^{-1}$).

Les substrats de quartz et de silicium sont ensuite recouverts de résine positive. Après insolation avec le masque illustré sur la figure 5.7, les métaux sont gravés par gravure humide, ce qui permet d'obtenir un meilleur état de surface de l'or qu'un procédé de «lift-off». En effet, ce procédé per-

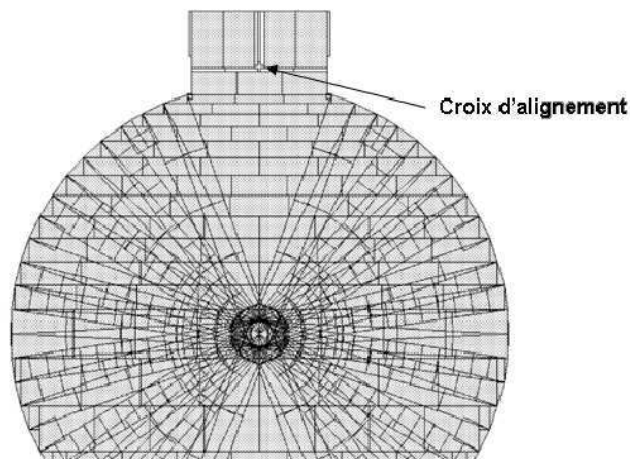


FIGURE 5.7 – Visualisation d'une partie du masque de microfabrication pour la gravure humide métallique pour un seul capteur de pression. On peut y voir différents rectangles représentant chacun un flash optique permettant l'insolation de la résine en vue de la réalisation d'un masque de photolithographie.

met d'obtenir des contours plus nets au niveau des motifs de microstructuration. Les épaisseurs de dépôts métalliques ne sont pas critiques. Toutefois, il est nécessaire que l'épaisseur totale du dépôt métallique sur le silicium ajouté au dépôt sur le quartz soit supérieur au dépôt d'aluminium pour le résonateur et les contacts électriques afin d'éviter tout problème lors du collage des substrats. La gravure humide de l'or s'effectue à une vitesse de 15 nm.s^{-1} . Le chrome se grave à une vitesse de 2 nm.s^{-1} .

La résine utilisée est de la résine SPR220 $5 \mu\text{m}$ dont le protocole de dépôt est le suivant :

- vitesse de rotation : 4000 tr.min^{-1} ,
- accélération : $4000 \text{ tr.min}^{-1}.\text{s}^{-1}$,
- temps de rotation : 30 secondes,
- recuit : 2 minutes 30 secondes à 115°C ,
- insolation : 300 mJ.cm^{-2} ,
- repos : 5 minutes.
- recuit : 1 minute 30 seconde à 130°C .
- insolation sans masque : 300 mJ.cm^{-2} .
- développement : MF26A pendant 90 secondes.

5.2.3.3 Micro-usinage du silicium

La gravure du support en silicium s'effectue en deux temps. La première étape consiste à réaliser la structure de la cavité permettant à la membrane de quartz de se mouvoir sous l'action des forces pressantes. La seconde partie consiste en la réalisation de trous débouchants dans le silicium afin de permettre la prise des contacts électriques.

La gravure est réalisée par DRIE. La microstructuration est réalisée à partir de la résine SPR220 $5 \mu\text{m}$. Nous utilisons le procédé Bosch BR15 [55], la sélectivité de cette résine pour ce procédé de gravure étant de 100 pour 1. Les paramètres de ce procédé sont :

- alternance de gravure du substrat par le gaz SF_6 pendant 7 secondes à 300 sccm puis protection du support par un polymère C_4F_8 pendant 2 secondes à 100 sccm,
- puissance de la source fixée à 1800 W,
- position de la vanne à 54 %,
- asservissement en température à 20 °C,
- puissance bias 80 W,
- pression à $3 \cdot 10^{-2}$ Pa,
- pression en hélium de 10 mbar,
- débit hélium de 0,3 sccm.

Avec ces paramètres, la vitesse de gravure du silicium est de l'ordre 5 à 6 $\mu\text{m} \cdot \text{minute}^{-1}$. La cavité pour la membrane est gravée à une profondeur de quelques dizaines de micromètres, valeur supérieure aux flèches maximales attendues lors de l'application d'une pression sur le quartz (pour plus de détails, se référer à la section 4.2 page 73). La figure 5.8 montre un substrat de silicium après traitement.



FIGURE 5.8 – Visualisation du substrat de silicium après micro-usinage.

5.2.3.4 Micro-usinage du quartz

Le substrat de quartz est préalablement nettoyé par un bain pirhana. Le substrat est nettoyé par un plasma d'oxygène afin de permettre une meilleure adhérence de la résine sur sa surface. Les électrodes du résonateur sont réalisées en aluminium et le dépôt d'aluminium est effectué par évaporation. La microstructuration du métal s'effectue par «lift-off» avec de la résine Ti09XR. Cette technique consiste à utiliser une résine inversible. Elle permet d'obtenir des flancs de résine obliques ce qui, après le dépôt d'aluminium, permet de conserver un contact entre le solvant et la résine comme l'illustre la figure 5.9. La figure 5.10 représente un substrat de quartz après traitement. Les paramètres utilisés pour le nettoyage plasma sont :

- puissance : 100 W,

- temps : 10 minutes,
- pression de l'enceinte : 100 μBar .

Le protocole de dépôt de résine Ti09XR est le suivant :

- vitesse de rotation : 2000 tr.min^{-1} ,
- accélération : 4000 $\text{tr.min}^{-1}.\text{s}^{-1}$,
- temps de rotation : 30 secondes,
- recuit : 1min 15 secondes à 100 °C,
- insolation : 90 mJ.cm^{-2} ,
- repos : 5 minutes,
- recuit : 1 min 30 seconde à 130 °C,
- insolation sans masque : 300 mJ.cm^{-2} ,
- développement : MF26A pendant 90 secondes.

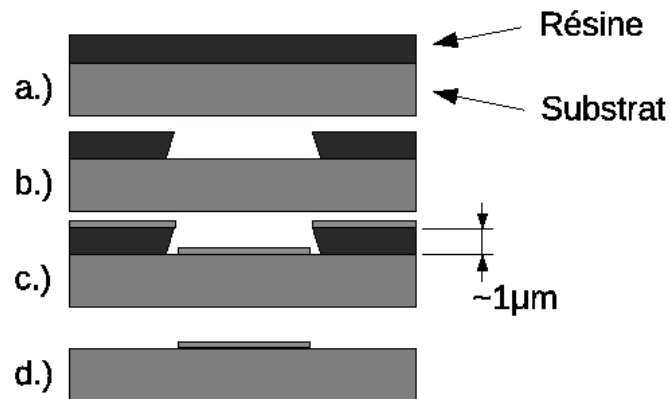


FIGURE 5.9 – Schéma de principe de microstructuration par lift-off et évaporation métallique. a.) Dépôt de la résine. b.) Structuration de la résine avec création de flanc obliques. c.) Dépôt par évaporation métallique. d.) Élimination par dissolution de la résine.

5.2.3.5 Collage des substrats, amincissement et découpage

Les substrats de quartz et de silicium sont nettoyés à l'aide d'un plasma argon avant d'être collé. Ce nettoyage est agressif pour l'aluminium et doit donc être bref (un passage, durée totale inférieure à la minute). Le débit en argon est fixée à 50 sccm.

Les substrats sont ensuite mis en vis à vis dans le wafer bonder afin d'être collés. Les paramètres utilisés pour le collage sont les suivants :

- asservissement en température 30 °C,
- asservissement en pression à 2.10^{-2} μBar ,
- action du piston 3000 N pendant 13 h,
- retrait du piston,
- retour à la pression ambiante.

Le substrat de quartz est aminci par abrasion mécanique afin d'obtenir une épaisseur permettant de mesurer des pressions dans la gamme désirée. Les capteurs sont ensuite découpés individuelle-

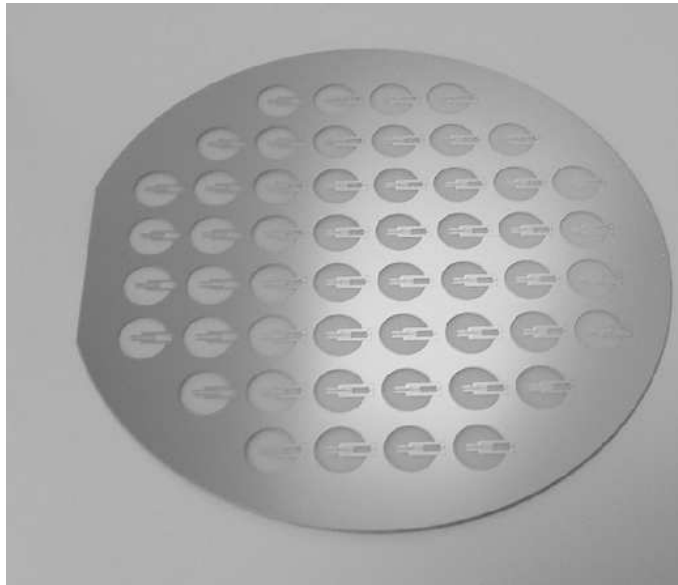


FIGURE 5.10 – Visualisation optique d'un substrat de quartz 4 pouces après micro-usinage complet.

ment. Le trait de découpe est placé juste après le contact électrique de manière à pouvoir effectuer des mesures directement avec le testeur sous pointe. La figure 5.11 permet de visualiser différentes parties du capteur ainsi que la figure 5.12

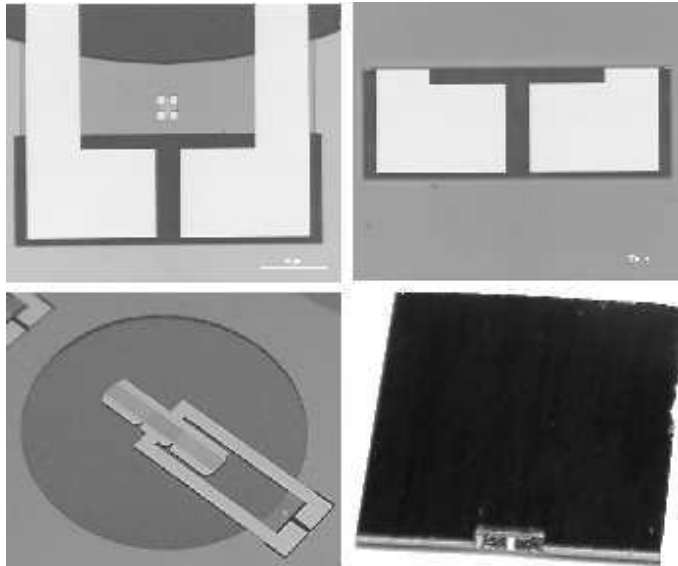


FIGURE 5.11 – Visualisation optique du capteur après fabrication ; en haut à gauche visualisation des contacts au travers de la membrane de quartz ; à droite, visualisation des contacts vu côté silicium. En bas à gauche, visualisation d'une partie d'un substrat après wafer bonding ; à droite, visualisation d'un capteur après découpage. On peut voir les contacts électriques qui permettront de réaliser facilement les tests opératoires.

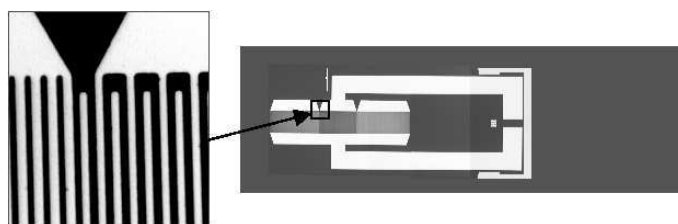


FIGURE 5.12 – Visualisation du résonateur et des pistes de contact électrique. On peut voir également une partie de l'or permettant le collage entre substrats.

5.3 Caractérisation

5.3.1 Caractérisation mécanique

5.3.1.1 Caractérisation de la membrane

Lors de l'amincissement de la membrane, des inhomogénéités de vitesse de rodage apparaissent et créent des inhomogénéités au niveau de l'épaisseur de la membrane. La figure 5.13 est une mesure réalisée par profilométrie le long d'un diamètre de la membrane une fois que celle-ci est amincie. L'épaisseur de la membrane a été amincie de 500 μm à 150 μm .

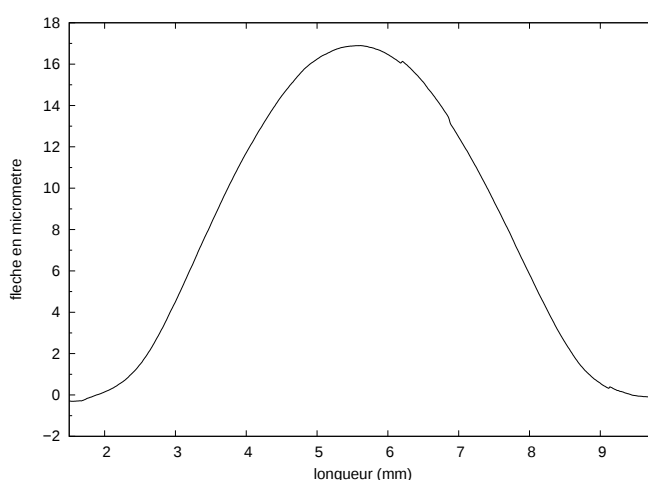


FIGURE 5.13 – Évolution de l'épaisseur relative de la membrane en fonction de sa position sur un diamètre du capteur pris sur une diagonale.

5.3.1.2 caractérisation du collage

Caractérisation par MEB Le microscope électronique à balayage est un microscope dont la technique d'observation est basée sur les interactions électrons/matière. Le principe consiste à bombarder la cible que l'on souhaite observer avec un faisceau d'électrons. Le flux d'électrons réémis par l'échantillon, transcrit en luminosité sur un écran permet, par balayage de l'échantillon, d'en visualiser la surface.

Caractérisation mécanique Un test simple permet de caractériser le collage. Il consiste à fixer le capteur entre deux barres métalliques soigneusement alignées, centrées et collées avec de la colle époxye comme l'illustre la figure 5.14. Dans un premier temps, une force de traction a été exercée sur le capteur. L'essai a été arrêté lorsque la force a atteint 500 N. Le collage a résisté. La résistance en traction du collage est donc supérieure à 7N.mm^{-2} . A titre de comparaison, la super glue tient jusqu'à 27N.mm^{-2}

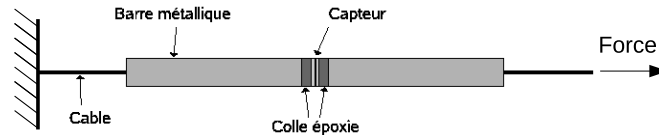


FIGURE 5.14 – Schéma de principe du système de caractérisation du collage.

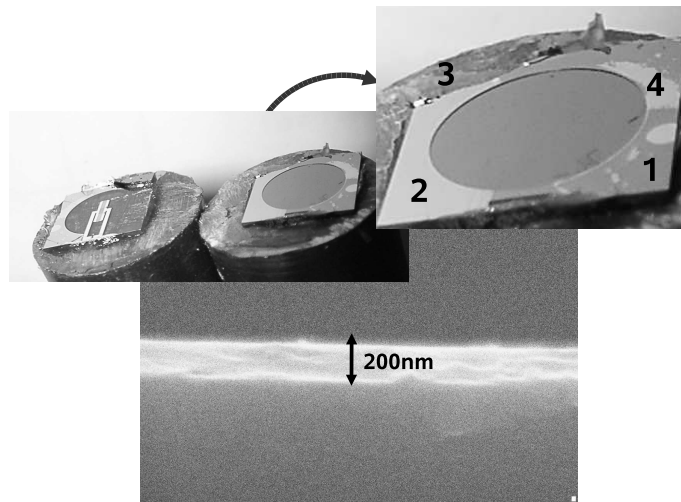


FIGURE 5.15 – En haut, visualisation de l'interface entre le quartz et le silicium après arrachement. En bas, visualisation par microscopie électronique à balayage de l'interface or-or permettant le collage de substrat.

La figure 5.15 illustre l'interface entre les substrats collés du capteur et montre que le collage est limité à la force de collage entre l'interface chrome-silicium et l'interface chrome-quartz comme l'illustre les zones 2 et 1 de la figure. La zone 4 est une zone où la rupture s'effectue au niveau de l'interface or-or. La zone 3 montre une zone de rupture du silicium probablement dû au couple de torsion exercée et non à la rigidité du collage or-or.

Caractérisation par ultrason Un banc de test permet de caractériser l'interface au niveau du collage entre les deux substrats. C'est un système de transmission par ondes ultrasonores qui permet de caractériser les zones de l'interface ayant une forte variation d'impédance acoustique. La figure 5.16 représente une photographie du banc réalisé au laboratoire. La mesure s'effectue dans l'eau afin de minimiser les variations d'impédance acoustiques sur le parcours des ondes ultrasonores.

Un exemple de caractérisation est présenté dans la la figure 5.17



FIGURE 5.16 – Photographie du banc ultrasonore réalisé au laboratoire.

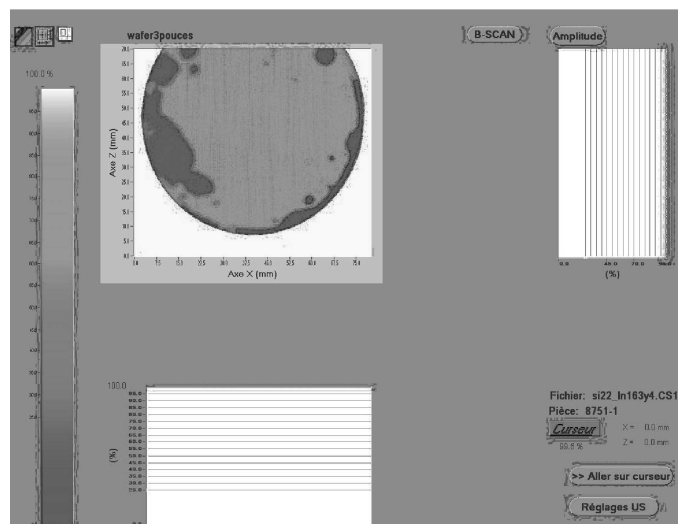


FIGURE 5.17 – Visualisation de la qualité de collage par ultrason entre un substrat de quartz et un substrat de silicium. La surface apparaissant en clair a peu de variation d'impédance au niveau de l'interface de collage alors que la surface foncée voit une forte variation et est donc mal collée.

5.3.2 Caractérisation électrique du capteur par l'analyseur de réseau

Un banc de test permet d'appliquer une pression fluide sur la membrane du capteur tout en permettant une analyse électrique via l'analyseur de réseau. Un joint torique assure l'étanchéité entre la membrane du capteur et le banc de mesure. L'inconvénient de ce banc de mesure est que le capteur est pris en sandwich entre le joint torique et le capot (cf. fig. 5.18). De fait, les contraintes au sein du capteur ne sont pas connues réellement lors des test sous pression.

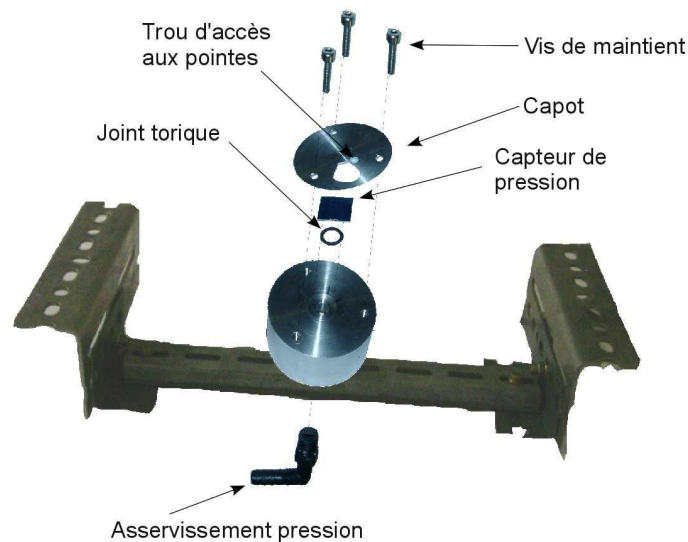


FIGURE 5.18 – Visualisation du banc de mesure en pression.

5.3.3 Interrogation à distance du capteur

Le capteur est relié à une antenne et la cavité sous la membrane est scellée hermétiquement. L'ensemble est plongé dans une bouteille dont la pression interne est asservie via un manomètre à robinet. La fréquence de résonance est enregistrée en fonction de la pression régnant dans la bouteille. Le principe d'interrogation consiste à générer un large spectre d'onde via un émetteur. Le résonateur emmagasine un maximum d'énergie pour sa fréquence de résonance et continue à résonner tout en générant des ondes au sein de l'antenne. La fréquence la plus émise au niveau de l'antenne correspond à la fréquence de résonance du dispositif.

Cette expérience montre ainsi la faisabilité d'interroger à distance le capteur de pression.

La courbe de la figure 5.19 indique la fréquence de résonance obtenues directement en fonction de la pression appliquée dans la bouteille alors que la figure 5.20 indique la variation de fréquence de résonance avec la pression appliquée.

La comparaison des résultats entre l'expérience et la modélisation sont présentées dans la figure 4.43 de la page 97 et montre la bonne corrélation du modèle développé avec l'expérience

5.4 Conclusion

Dans cette partie, nous décrivons d'une part les différentes étapes technologiques ayant permis l'élaboration du capteur de pression ainsi que les machines utilisées. Pour chaque étape, les paramètres utilisés pour le procédé sont détaillés. D'autre part, le capteur est caractérisé d'un point de vue mécanique et électrique afin de valider les étapes fondamentales de sa conception. On a également montré la possibilité de réaliser des mesures de pression avec ce capteur en mode filaire mais également en mode sans fil.

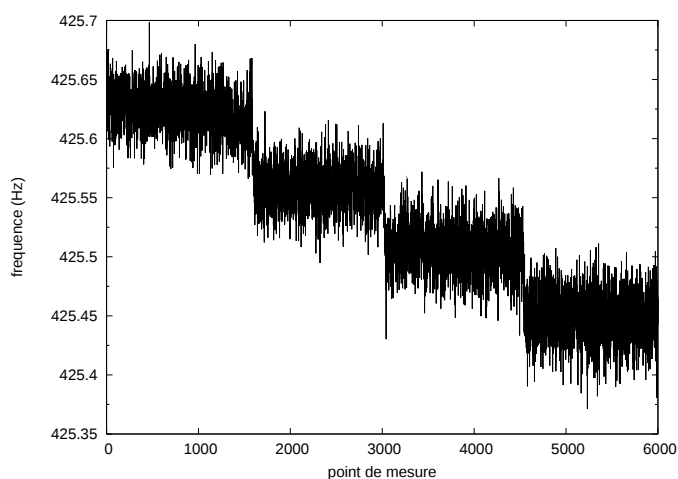


FIGURE 5.19 – Évolution de la fréquence de résonance en fonction des points de mesure.

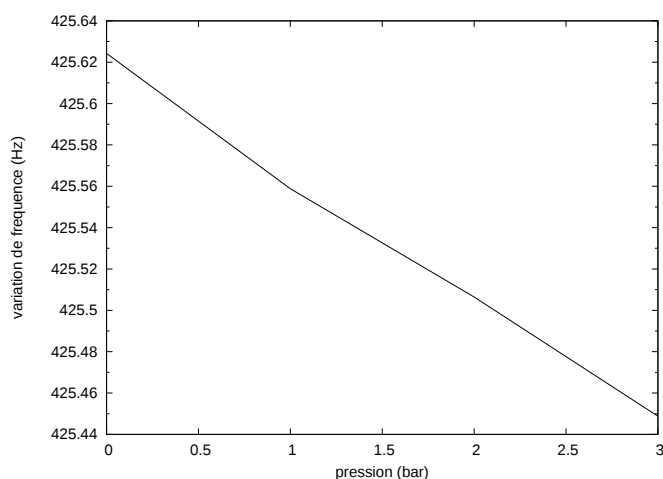


FIGURE 5.20 – Évolution de la fréquence de résonance du capteur en fonction de la pression appliquée dans la bouteille obtenu après moyennage.

L'avantage du capteur développé est qu'il est directement packagé. Par contre, comme on l'a montré dans le chapitre précédent, il existe semble exister des zones insensibles à la pression sur la membrane. Or l'alignement des deux substrats est difficile à réaliser de fait, il est difficile de réaliser un capteur de pression avec une référence intégrée en suivant ce procédé.

