

UNIVERSITE PARIS-SUD

ÉCOLE DOCTORALE : *Science et Technologie de l'Information des télécommunications et des systèmes (STITS)*

Laboratoire : Institut d'Electronique Fondamentale

DISCIPLINE : Physique

THÈSE DE DOCTORAT

soutenue le 23/07/2013

par

Hervé BERTIN

Etude de matrices de filtres Fabry Pérot accordables en technologie MOEMS intégré 3D : Application à l'imagerie multispectrale

Directeur de thèse : Alain BOSSEBOEUF Directeur de Recherche CNRS, IEF, Orsay

Composition du jury :

Président de jury	Pierre CHAVEL	Directeur de Recherche CNRS, Laboratoire Charles Fabry, Institut d'Optique, Orsay
Rapporteurs	Christophe GORECKI Christian SEASSAL	Directeur de Recherche CNRS, FEMTO-ST, Besançon Directeur de Recherche CNRS, INL, Lyon
Examineurs	Frédéric ZAMKOTSIAN Henri CAMON Oscar D'ALMEIDA	Chargé de Recherche CNRS, LAM, Marseille Directeur de Recherche CNRS, LAAS, Toulouse Directeur Technique Détecteurs, SAGEM DS, Paris

Remerciements

Tout d'abord, je souhaite remercier Jean-Michel Lourtioz, Claude Chappert, et André de Lustrac, les trois directeurs successifs de l'Institut d'Electronique Fondamentale, de m'avoir permis de faire cette thèse dans leur laboratoire.

Bien sûr, j'exprime une grande reconnaissance à mon directeur de thèse Alain BOSSEBOEUF pour tous ses conseils, qui m'ont beaucoup aidé et me seront utiles dans la suite de ma carrière. De même j'ai été très satisfait du sujet de thèse qui m'a été proposé, car ce sujet est riche en débouchés et m'a permis d'acquérir une expérience précieuse dans des domaines variés.

Je remercie les rapporteurs Christophe GORECKI et Christian SEASSAL, pour leur relecture attentive et pour leurs observations, je les remercie également, ainsi que les autres membres du jury Pierre CHAVEL, Frédéric ZAMKOSTIAN, Henri CAMON et Oscar D'ALMEIDA, pour avoir accepté d'assister (exceptionnellement pour certains) à ma soutenance de thèse.

Je remercie tout particulièrement Nicolas ROUX, Michel PEALAT et Jacques LONNOY de la SAGEM qui ont permis, grâce à l'Action de Recherche Coordonnée qu'ils ont proposée, de donner un objectif motivant à cette thèse et les moyens financiers nécessaires pour réaliser les travaux. Je remercie de même toutes les autres personnes qui ont pu suivre ou participer directement ou indirectement à cette thèse, comme Yann FERREC, Vincent RAGOT, et André RINCHET. De même, je souhaite remercier Jean MINET et Jean TABOURY pour leurs contributions importantes à ce projet, en me communiquant les spécifications à respecter.

A l'IEF, je suis reconnaissant à tous les permanents du département Microsystèmes et NanoBiotechnologies pour leur accueil et leur soutien. Je remercie mes compagnons de bureau, Sylvain PERROT et Philippe COSTE, toujours prêts à répondre à mes questions, et aussi tous les autres chercheurs du département avec lesquels j'ai eu l'occasion de travailler : Johan MOULIN, Fabien PARRAIN, Emile MARTINSIC, Marion WOYTASIK, Elie LEFEUVRE, Fillipo FABBRI, Hervé MATHIAS. De même, je n'oublie pas l'aide qui m'a été apportée par Samson EDMOND pour les images MEB et par Xavier LEROUX qui a partagé son expérience de la micro-fabrication.

Je suis aussi reconnaissant aux personnels de la SAREM : Alexis POIZAT qui m'a assisté dans la conception et la fabrication de la hotte pour les dry films, Koro SOKHONA qui m'a fourni les composants mécaniques nécessaires à certaines de mes expériences, et enfin Claude SELLOS et Abdelkader BOUKRIT qui ont usiné certaines des pièces mécaniques dessinées pendant cette thèse.

Parmi tous les anciens doctorants que j'ai eu le plaisir de rencontrer, je tiens à remercier tout particulièrement ceux avec qui j'ai pu collaborer: Olivier LEGENDRE, Iannis ROLAND, Sébastien BRAULT, Guillaume SCHELCHER, Alexandre HOUDOIN, Sébastien NAZEER,

Vincent BEIX, Pierre ALLAIN, Iman SHAHOSSEINI, Magdalena COUTY et Mériam AZZOUZ, car l'expérience acquise à leurs côtés m'a été utile pour mon sujet de thèse.

Enfin j'exprime ma reconnaissance à tout le personnel de la CTU : David BOUVILLE, François MAILLARD, Marie-Paule PLANTE, Fabien BAYLE, Benoît BELIER, Frédéric FOSSARD, Cédric VILLEBASSE, Jean René COUDEVYLLE, Nathalie ISAC, Jean-Luc PERROSIER, Antoine MARTIN, Delphine NEEL, Véronique MATHET et Sylvain DAVID ; ainsi qu'au responsable de la CTU Daniel BOUCHIER, car les machines de salle blanche sont parfois capricieuses et sans leurs interventions je n'aurais pas pu faire grand chose.

Enfin, ces remerciements ne seraient pas complets si je ne mentionnais pas mes parents Yves BERTIN et Nang VILOUNSY qui m'ont soutenu durant toute cette thèse.

Liste des abréviations

PECVD : Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition (Dépôt Chimique en Phase Vapeur Assisté par Plasma)

RIE : Reactive Ion Etching (Gravure Ionique Réactive)

DRIE : Deep Reactive Ion Etching (Gravure Ionique Réactive Profonde)

FWHM : Full Width at Half Maximum (Largeur à Mi-Hauteur)

ISL : Intervalle Spectral Libre

MEMS : Micro Electro-Mechanical System (Microsystème électro-mécanique)

MOEMS : Micro Optical Electro-Mechanical System (Microsystème opto-électro-mécanique)

SOI : Silicon On Insulator (Silicium sur Isolant)

YF₃ : Fluorure d'yttrium

ZnS : Sulfure de zinc

SiO₂ : Silice

Si₃N₄ : Nitrure de silicium

XeF₂ : Difluorure de Xenon

HF : Acide fluorhydrique

BHF : Acide fluorhydrique tamponné (NH₄ : HF)

CVT : Centroidal Voronoi Tessellation

Sommaire

<u>Introduction générale</u>	<u>11</u>
<u>Chapitre 1 L'imagerie spectrale</u>	<u>15</u>
1.1 Différences entre une caméra hyperspectrale et une caméra multispectrale	16
1.2 Principales méthodes d'acquisition simultanée du spectre et de l'image	19
1.3 Vers un spectro-imageur intégré.....	20
<u>Chapitre 2 Etat de l'art des technologies de fabrication et performances des filtres Fabry Pérot intégrés</u>	<u>23</u>
2.1 Principe de fonctionnement d'un Fabry Pérot	24
2.2 Limitations des méthodes de micro-fabrication	27
2.3 Filtres Fabry Pérot micro-usinés	30
2.3.1 <i>Micro-usinage de surface</i>	31
2.3.2 <i>Micro-usinage de volume</i>	35
2.3.3 <i>Caractéristiques et performances des Fabry Pérot micro-usinés</i>	41
2.4 Conclusion	44
<u>Chapitre 3 Conception de la matrice de Fabry Pérot ajustables intégrés 3D.....</u>	<u>47</u>
3.1 Conception des miroirs diélectriques	49
3.1.1 <i>Transmittance d'un filtre Fabry Pérot idéal</i>	49
3.1.2 <i>Transmittance d'un filtre Fabry Pérot dissymétrique</i>	52
3.1.3 <i>Conception des multicouches des miroirs fixes et mobiles</i>	55
3.1.4 <i>Conclusion</i>	72
3.2 Conception mécanique et électromécanique	74
3.2.1 <i>Course d'actionnement du miroir mobile</i>	74
3.2.2 <i>Espace entre électrodes</i>	75
3.2.3 <i>Dessin de la géométrie</i>	78
3.2.4 <i>Simulations mécanique par éléments finis</i>	80
3.2.5 <i>Conclusion</i>	89
3.3 Etapes du procédé de fabrication.....	91
3.3.1 <i>Miroir mobile</i>	92
3.3.2 <i>Miroir fixe</i>	95
3.3.3 <i>Assemblage</i>	96

3.3.4	<i>Conclusion</i>	97
3.4	Conclusion sur la conception	98
<u>Chapitre 4 Fabrication et caractérisation des miroirs diélectriques</u>		103
4.1	Choix des matériaux diélectriques et propriétés des films dans les conditions "standards" de dépôt	104
4.1.1	<i>Analyse des dépôts standards</i>	104
4.1.2	<i>Conclusion sur les dépôts standards</i>	110
4.2	Choix de la méthode pour contrôler les contraintes résiduelles	111
4.2.1	<i>Contrôle des contraintes par modification des recettes de dépôt</i>	111
4.2.2	<i>Contrôle des contraintes par recuits</i>	113
4.3	Recuits de couches simples	114
4.3.1	<i>Procédure expérimentale</i>	114
4.3.2	<i>Résultats</i>	115
4.3.3	<i>Conclusion : choix des couches à utiliser</i>	118
4.4	Recuit des miroirs multicouches	119
4.4.1	<i>Reproductibilité des recuits</i>	120
4.4.2	<i>Prévision de la température minimale de recuit</i>	121
4.4.3	<i>Apparition de trous après recuit</i>	122
4.4.4	<i>Recuit d'un miroir structuré</i>	124
4.4.5	<i>Conclusion sur les mesures de contraintes résiduelles</i>	126
4.5	Libération et propriétés des membranes	127
4.5.1	<i>Procédé de libération des membranes et rendement</i>	127
4.5.2	<i>Propriétés géométriques et optiques des membranes</i>	130
4.5.3	<i>Planéité</i>	132
4.6	Conclusion sur la fabrication des miroirs diélectriques	136
<u>Chapitre 5 Contrôle des vitesses de gravure DRIE</u>		139
5.1	Limitations de la gravure DRIE	140
5.2	Choix de la méthode de contrôle des vitesses de gravure DRIE	142
5.2.1	<i>Conclusion</i>	144
5.3	Masque de test des motifs de remplissage	145
5.3.1	<i>Dessin du masque</i>	145
5.3.2	<i>Résultats des tests de gravure</i>	146
5.3.3	<i>Conclusion</i>	150
5.4	Optimisation des motifs de remplissage	151

5.4.1	<i>Motifs de remplissage détachables en fin de gravure</i>	151
5.4.2	<i>Nouveau dessin des motifs de remplissage</i>	154
5.5	Conclusion	158
Chapitre 6 Protection des structures lors de la gravure XeF₂		161
6.1	Utilisation d'une couche de passivation DRIE	162
6.1.1	<i>Principe</i>	162
6.1.2	<i>Résistance du PTFE au XeF₂</i>	164
6.1.3	<i>Structuration du PTFE par un pochoir en silicium</i>	164
6.1.4	<i>Alignement mécanique du pochoir en silicium</i>	165
6.1.5	<i>Conclusion</i>	168
6.2	Lithographie avec films secs photosensibles	169
6.2.1	<i>Intérêt des films secs</i>	169
6.2.2	<i>Equipements utilisés</i>	171
6.2.3	<i>Procédure d'entrésinement</i>	173
6.2.4	<i>Tests technologiques</i>	175
6.2.5	<i>Conclusion</i>	178
Conclusion générale		181
Annexes		189
A	Modèle analytique de la transmittance d'un filtre Fabry Pérot dissymétrique	191
B	Caractérisation des films par ellipsométrie	195
C	Mesure des contraintes résiduelles par balayage laser	199
D	Traitement des analyses FTIR, retrait de la ligne de base	201
E	Filtres Fabry Pérot accordables en technologie SOI	209

Introduction générale

Cette thèse financée par le Ministère de la recherche a été menée au sein de l'équipe "MNOEMS et Instrumentation" du département "Microsystèmes et NanoBioTechnologies" de l'Institut d'Electronique Fondamentale (IEF). Elle s'est largement appuyée sur les moyens de microfabrication et de caractérisation de la Centrale de Technologie Universitaire (CTU) de l'IEF et de ce département.

L'objectif général de la thèse était l'étude des verrous technologiques des Microsystèmes OptoElectroMécaniques (MOEMS) lorsqu'ils sont intégrés 3D, c'est-à-dire réalisés par empilement de plusieurs wafers et/ou puces.

Beaucoup de MOEMS restent fondés sur une intégration horizontale où la lumière est générée et détectée dans le plan du wafer, souvent à l'aide de fibres optiques insérées dans des rainures ou à l'aide de puces séparées. L'intégration 3D est plus complexe à mettre en œuvre mais présente des avantages certains par rapport à une intégration horizontale. En effet, elle permet :

- la fabrication de MOEMS plus compacts, et donc la possibilité d'envisager la réalisation de matrices de MOEMS ;
- une meilleure séparation des fonctions par wafer. Ceci facilite la réutilisation des briques technologiques et la réalisation de microsystèmes optoélectromécaniques plus complexes ;
- une intégration hétérogène et multi-échelles c'est-à-dire le mélange de différentes technologies (Si, III-V, verre, polymère) et d'échelles (macro, micro, nano) ;
- une fabrication collective ;
- l'intégration du packaging (packaging au niveau du wafer ou de la puce).

Le département Microsystèmes et NanoBioTechnologies envisageait déjà en 2003 la réalisation de matrices de MOEMS pour la mesure simultanée de plusieurs MEMS sur un wafer, et quelques travaux sur la réalisation de composants micro-optiques et de membranes dans différents matériaux ont été réalisés. Toutefois, les premiers travaux conséquents sur les MOEMS intégrés 3D ont réellement été amorcés avec cette thèse.

Ce vaste sujet a dû être restreint au cas concret d'une matrice de filtres Fabry Pérot ajustables pour l'imagerie multispectrale. Cette application s'inscrit dans une action de recherche coordonnée de la Sagem Sécurité Défense du groupe Safran qui a débuté avec cette thèse. Ce

projet a été mené en collaboration avec la Sagem, le Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique (LCFIO) et l'Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA). Bien qu'orientés vers une application précise, les travaux ont été menés avec le souci de limiter les inconvénients des solutions technologiques proposées afin de pouvoir réutiliser pour d'autres MOEMS intégrés 3D les briques technologiques qui seraient développées. Cette thèse a ainsi permis d'étudier différents problèmes communs à beaucoup de MOEMS intégrés 3D, tels l'intégration de miroirs semi-transparents de grande surface et de très bonne planéité, l'intégration d'un actionneur en technologie MEMS avec possibilité de contrôle intégré du déplacement, le contrôle des déformations des microstructures mécaniques, la gravure profonde de motifs de dimensions très variables, l'assemblage de wafers avec une séparation contrôlée, etc....

Deux thèses ont été menées en parallèle pour progresser vers l'objectif de réalisation d'une caméra multispectrale polyvalente de haute performance :

La première thèse, menée à l'Institut d'optique et à la Sagem par Jean Minet [Minet 2011a], a étudié le traitement des images et la conception optique de l'imageur. Elle a été soutenue en 2011 et a abouti à la mise au point d'un algorithme génétique de sélection de bandes ainsi qu'à la définition du cahier des charges pour une caméra multispectrale dans le domaine visible proche-infrarouge.

La deuxième thèse, dont les résultats sont présentés ici, a étudié les potentialités de la technologie MOEMS intégrée 3D pour réaliser des matrices de filtres accordables de type Fabry Pérot, dans le respect du cahier des charges défini par la SAGEM.

L'organisation de ce mémoire de thèse est la suivante :

Le début du premier chapitre est consacré à une présentation générale puis plus détaillée de l'imagerie spectrale et du contexte de l'action de recherche coordonnée de la Sagem. Nous verrons que ceci a permis de définir en commun un cahier des charges précis de la matrice de filtres ajustables fondés sur l'utilisation de micro-interféromètres Fabry Pérot intégrés.

Le deuxième chapitre présente un état de l'art de la technologie et des performances des micro-interféromètres Fabry Pérot intégrés, ainsi que l'approche technologique qui a été finalement retenue.

Le troisième chapitre détaille les étapes de la conception optique et électromécanique des filtres Fabry Pérot en technologie silicium. Pour ne pas alourdir le texte et parer aux risques de confusions, le cas des filtres Fabry Pérot en technologie SOI, initialement envisagé et étudié la première année, a été reporté en annexe.

En raison de la complexité du procédé de fabrication (12 niveaux de masquage), l'obtention d'une matrice de filtres n'était pas envisageable dans le cadre d'une seule thèse. Mais de

nombreux tests technologiques de différentes étapes critiques ont été effectués, et différentes innovations technologiques ont été proposées ; Les résultats de ces travaux et des caractérisations associées sont présentés dans les chapitres quatre, cinq, et six.

Nous concluons ce mémoire de thèse en présentant une synthèse générale des résultats, une analyse des points restant à examiner et des procédés restant à développer, et enfin nous présenterons les perspectives de ces travaux et du département dans le domaine des MOEMS intégrés 3D.

Chapitre 1

L'imagerie spectrale

L'imagerie spectrale est l'application visée de la matrice de filtres en technologie MOEMS intégrés 3D étudiée dans cette thèse.

L'idée à la base de l'imagerie spectrale est que chaque objet possède sa propre signature spectrale : tous les matériaux absorbent, réfléchissent, transmettent ou émettent des ondes électromagnétiques différentes en fonction de leur structure physique et de leur composition chimique. L'imagerie spectrale consiste à acquérir un spectre (continu ou non) pour chacun des pixels composant une image.

La vision couleur de l'œil humain est un bon exemple de spectro-imageur. En effet, la rétine est tapissée de deux types de cellules : les cônes et les bâtonnets. De jour seuls les cônes sont utilisés. Ce sont eux qui nous donnent la vision couleur car ils sont sensibles aux longueurs d'onde des bandes centrées à environs 420-440 nm (bleu), 534-555 nm (vert) et 564-580 nm (rouge). La combinaison de ces trois couleurs primaires nous permet ainsi de percevoir les couleurs, avec un pic de sensibilité pour les couleurs vertes et jaunes.

Le but du projet financé par la Sagem est de permettre la détection automatique d'objets camouflés, à l'aide de la spectro-imagerie. Ce type de caméra est difficile à développer, car pour diminuer les erreurs de détection, il faut augmenter de manière fiable et importante le contraste entre la cible et le fond, l'idéal étant d'avoir une image en noir et blanc, séparant nettement l'anomalie du fond. Pour y arriver il faut sélectionner les bandes de longueurs d'onde observées, à la fois en fonction de l'environnement, et de ce que l'on y recherche.

Dans les parties suivantes, je présenterai d'abord les méthodes d'acquisition existantes pour recueillir le spectre et l'image, puis je détaillerai les résultats obtenus par Jean Minet durant sa thèse.

1.1 Différences entre une caméra hyperspectrale et une caméra multispectrale

Les caméras spectrales sont classées en deux catégories : les caméras hyperspectrales et les caméras multispectrales. Ces deux caméras remplissent la même fonction, mais elles diffèrent principalement par le nombre de bandes composant les spectres qu'elles acquièrent. Ainsi, comme schématisé sur la figure 1.1, les caméras hyperspectrales sont souvent capables d'acquérir plus de 100 bandes spectrales de 10 à 20 nm de large ; tandis que les caméras multispectrales sont plus limitées, acquérant moins de 20 bandes spectrales, souvent non contiguës.

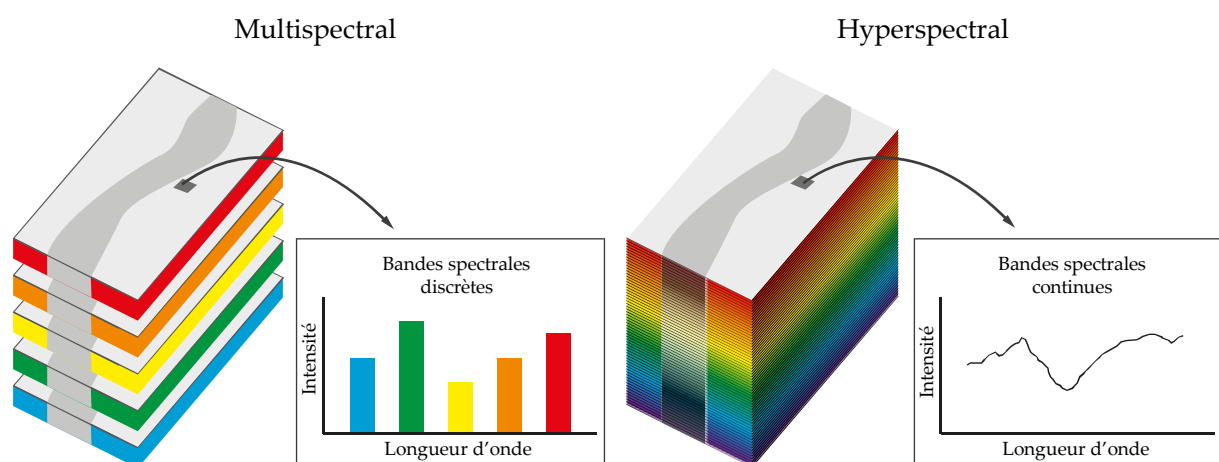


Figure 1.1 : Les caméras multispectrales acquièrent un nombre restreint de bandes spectrales, alors que les caméras hyperspectrales acquièrent un spectre qui est souvent quasi continu, avec un nombre plus élevé de bandes spectrales. [Ingvaldsen 2012]

Pour l'instant, les spectro-imageurs sont utilisés dans des domaines très précis, pour lesquels l'utilisateur sait exactement ce qu'il doit observer. Ainsi, grâce à une gamme étendue de longueurs d'ondes, inaccessibles à l'œil humain, allant de l'UV aux infrarouges, la spectro-imagerie peut être utilisée dans des domaines très variés :

Par exemple, en agriculture [Gat 2000], la spectro-imagerie permet de surveiller le développement et la santé des cultures, et donc de traiter rapidement les maladies ou de fournir la bonne quantité d'eau aux plantes. En géologie, à l'aide d'un simple survol en avion, les spectro-imageurs permettent de répertorier les différents types de minéraux présents à la surface du sol. En cas d'accident industriel, la nature et la position de nuages de gaz dangereux peuvent être détectées à distance. Cela permet aux secours de réagir plus efficacement et avec moins de risques. Pour de la surveillance, les spectro-imageurs permettent de détecter des cibles camouflées [Minet 2011b] (cf. figure 1.2).

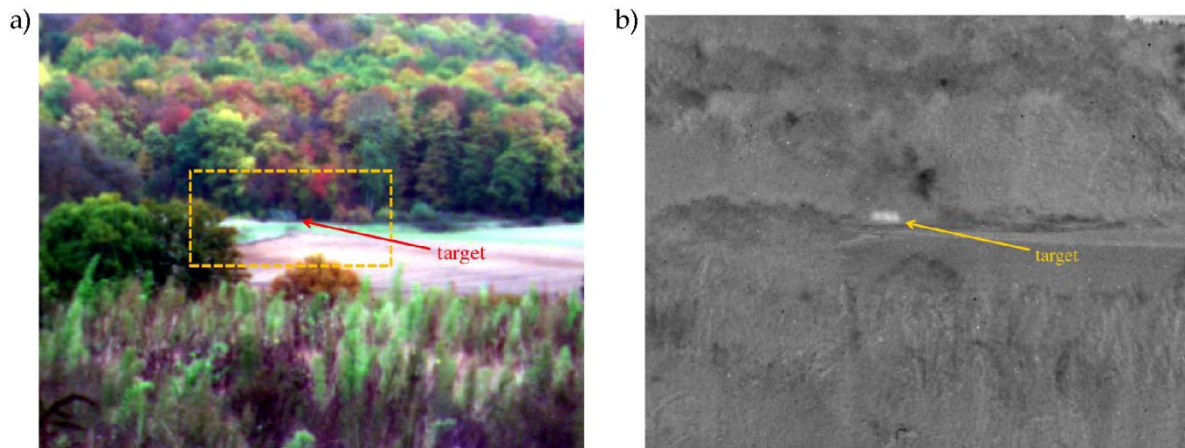


Figure 1.2 : Exemple d'utilisation de l'imagerie spectrale pour la détection d'objets camouflés. a) Image couleur de la scène observée. b) Mise en évidence de la cible. [Minet 2011b]

Les caméras multispectrales sont sans doute les premières à avoir vu le jour, car leur fabrication est plus simple : elle peut simplement consister à utiliser en même temps plusieurs appareils photographiques avec un filtre différent en face de chaque objectif [Underwood 1972]. Cependant, l'efficacité de ce type de caméra a longtemps été limitée par la sensibilité restreinte des films photographiques aux différentes longueurs d'ondes. Il a fallu attendre certaines avancées techniques (capteurs CCD, micro-processeurs) pour voir apparaître des caméras multispectrales aux capacités moins limitées et plus faciles à utiliser. Par exemple, on peut citer au début des années 1970 les caméras multispectrales embarquées sur des satellites comme SPOT ou LANDSAT.

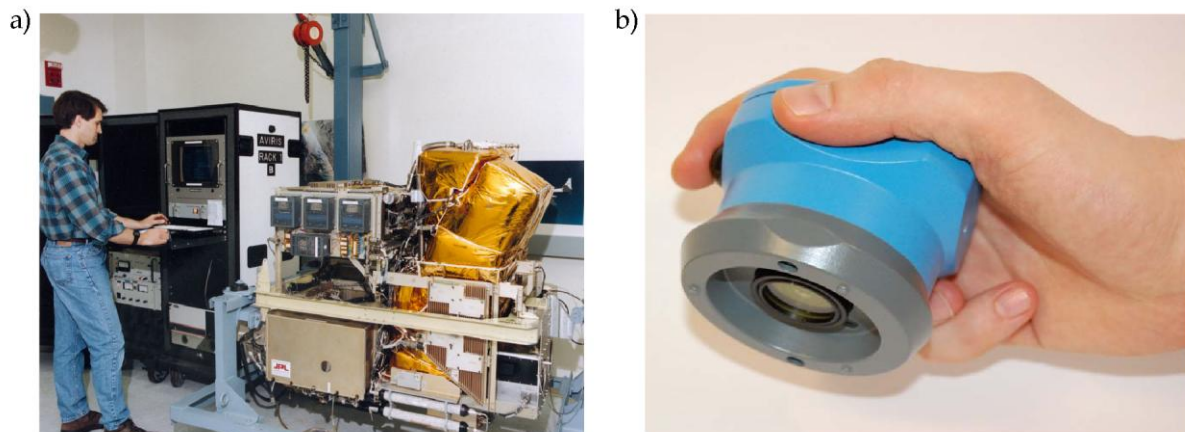


Figure 1.3 : a) Photographie de la caméra hyperspectrale AVIRIS développée par la NASA dans les années 1970-80.

b) Un prototype de caméra hyperspectrale récemment développée par le laboratoire VTT (Finlande).

Les caméras hyperspectrales sont plus complexes à fabriquer, et ne sont apparues qu'à la fin des années 1970 et au début des années 1980. La caméra AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer) visible sur la gauche de la figure 1.3a, a été développée par la NASA dans les années 1980. Elle est l'une des toutes premières caméras hyperspectrales capables de recueillir des images avec une bonne résolution spectrale sur 224 bandes, dans une gamme

de longueurs d'onde allant de 410 à 2450 nm, mais la caméra est encombrante et pèse 370 kilos.

De nos jours, les progrès de l'informatique et la miniaturisation de certains composants optiques rendent les caméras spectrales plus compactes (figure 1.3b). Par ailleurs, la baisse de leurs coûts de fabrication ne limite plus leurs utilisations aux applications militaires ou scientifiques de pointe.

1.2 Principales méthodes d'acquisition simultanée du spectre et de l'image

Il existe de nombreuses méthodes et montages optiques qui permettent de faire de la spectro-imagerie. Dans cette thèse, je n'entrerai pas dans les détails des avantages et inconvénients de chacune des méthodes, car cela a déjà été fait dans la thèse de Jean Minet [Minet 2011a]. Pour résumer, les deux informations (image et spectre) sont souvent difficiles à acquérir de manière simultanée, et pour surmonter cette difficulté, quatre méthodes d'acquisition sont couramment utilisées :

- Balayage spectral : l'intégralité d'une image est acquise pour une seule gamme de longueurs d'ondes à la fois, et le spectre est obtenu par un balayage spectral au moyen de filtres accordables.
- Balayage spatial : l'intégralité du spectre est mesuré sur des portions successives de l'image (une ligne ou un point) : la totalité de l'image est ensuite acquise par balayage de la scène.
- Système à transformée de Fourier : cette méthode d'acquisition nécessite soit un balayage spatial, soit la translation d'un miroir pour acquérir une figure d'interférence sur chaque pixel de l'image. Le spectre n'est obtenu qu'après une transformée de Fourier de l'interférogramme.
- Utilisation de filtres fixes : plusieurs imageries de la même scène sont simultanément acquises, avec pour chaque imagerie, un filtre différent.

L'imagerie spectrale nécessite souvent de faire des compromis entre la durée d'acquisition, la résolution spatiale, et la résolution spectrale de l'image. Pour ce faire, deux types de caméras sont souvent utilisées avec pour chacune, des avantages et inconvénients :

Les trois premières méthodes d'acquisition sont souvent utilisées dans des caméras hyperspectrales. Elles ont en effet pour avantage d'acquérir un spectre quasi-continu, qui permet une analyse fine du spectre des objets observés. Cependant, ces caméras sont limitées par l'acquisition d'un spectre continu qui nécessite un balayage spectral ou spatial de la scène. Les montages optiques à réaliser ont donc souvent l'inconvénient d'avoir des composants mobiles, lesquels sont sensibles aux vibrations, aux variations de températures, et nécessitent parfois un positionnement au nanomètre près. Un balayage suppose aussi que les objets observés demeurent relativement fixes pendant la durée d'acquisition. De plus, les caméras hyperspectrales fournissent un volume important de données à traiter, et requièrent donc une chaîne de traitement numérique efficace. Il en résulte que cette catégorie d'imageurs coûte souvent cher.

A l'inverse, les caméras multispectrales ont pour caractéristique de n'acquérir qu'un faible nombre de bandes spectrales. L'avantage est de permettre une acquisition simultanée des images sur plusieurs bandes spectrales. Mais les filtres sont souvent fixes, il faut donc, en fonction de l'application, sélectionner les bonnes bandes spectrales à observer.

1.3 Vers un spectro-imageur intégré

Ces avantages et inconvénients des différents types de spectro-imageurs ont été analysés en détail dans la thèse de Jean Minet à l'Institut d'Optique, menée en collaboration avec la Sagem et l'ONERA [Minet 2011a]. Le but de sa thèse était de trouver la meilleure solution technique pour réaliser un spectro-imageur compact à images instantanées (snapshot) dans le domaine visible / proche infrarouge. L'application que visait la Sagem pour cette caméra multispectrale était la détection d'objets camouflés.

Au cours de sa thèse, Jean Minet a réalisé une caméra multispectrale avec 20 filtres fixes, et dimensionné un second type de caméra avec des filtres accordables. A l'aide d'une caméra hyperspectrale, il a réalisé des mesures en situation réelle sur des cibles fixes. Ces mesures lui ont permis de développer un algorithme capable de sélectionner automatiquement une combinaison de filtres à utiliser, soit en fonction du spectre des cibles à rechercher, soit par détection d'anomalies.

L'un de ses résultats les plus intéressants est représenté dans la figure 1.4 qui représente l'efficacité de différents types de filtres optimisés pour un scénario de détection donné. Elle permet de remarquer que pour quatre Fabry Péro, le contraste entre une cible et le fond est :

- similaire à celui obtenu par quatre filtres passe-bande ;
- plus élevé qu'avec quatre filtres mono-bande.

De plus, au delà de quatre filtres, l'augmentation du contraste entre la cible et le fond est faible, et les filtres Fabry Péro restent aussi efficaces que les filtres passe-bande.

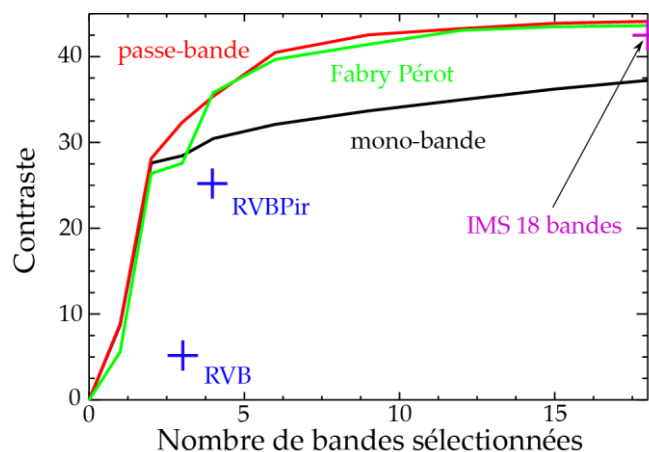


Figure 1.4 : Contraste entre la cible et le fond en fonction du nombre de bandes sélectionnées pour différents types de filtres.

Ces résultats ont donc orienté la recherche vers la réalisation d'une caméra multispectrale avec quatre filtres Fabry Péro accordables. De plus, comparés à d'autres filtres accordables

tels que les filtres acousto-optiques, ou les filtres à cristaux liquides, les filtres Fabry Péroth ajustables présentent les avantages suivants :

- le filtrage ne dépend pas de la polarisation de la lumière (en incidence normale) ;
- le déplacement nécessaire du miroir mobile est faible ;
- l'asservissement du gap d'air de la cavité permet de compenser les variations de températures et les accélérations parasites ;
- peu de changements sont à réaliser sur le montage optique déjà fabriqué par Jean Minet et qui est composé de 20 filtres fixes.

La matrice de filtres développée pendant cette thèse utilisera le montage optique schématisé sur la figure 1.5a. La séparation spatiale du front d'onde dans un plan pupillaire a été retenue par Jean Minet pour permettre d'obtenir quatre images identiques de la même scène. Les faisceaux incidents sont d'abord collimatés, passent à travers la matrice de 4 filtres Fabry Péroth, puis par un réseau de quatre micro-lentilles pour former quatre images de la même scène sur le capteur d'imagerie.

Le capteur d'imagerie étant divisé en quatre portions égales, il faudra donc fabriquer quatre filtres Fabry Péroth (figure 1.5b), chacun constitué de deux miroirs semi-réfléchissants. La variation du gap d'air entre les deux miroirs permettra de sélectionner la longueur d'onde filtrée. Les caractéristiques optiques et géométriques des filtres à réaliser seront détaillées dans le cahier des charges présenté dans la partie 3.1.3.1 (p55).

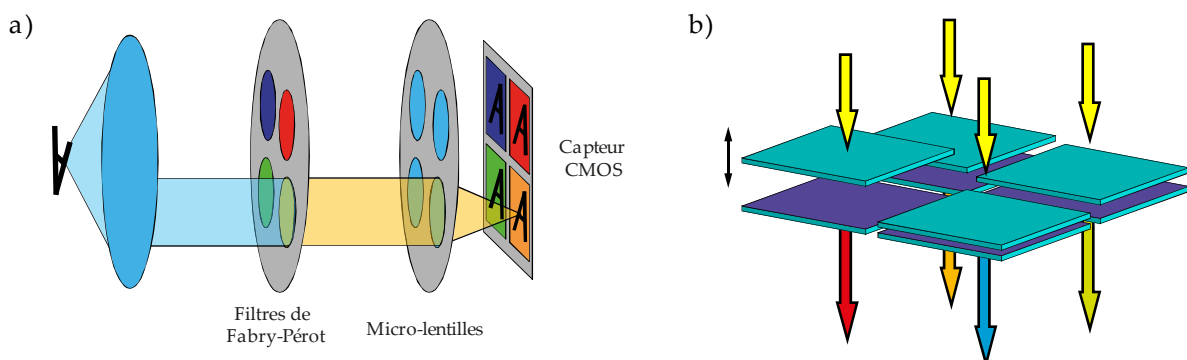


Figure 1.5 : a) Schéma montrant le principe du montage optique permettant d'utiliser quatre filtres Fabry Péroth pour obtenir quatre images sur le même capteur.

b) Détail de la matrice de filtres, la variation du gap d'air entre les miroirs permet de sélectionner la longueur d'onde transmise.

Dans le chapitre suivant, je présente un état de l'art des différentes technologies de micro-fabrication utilisées par d'autres auteurs pour réaliser des micro-interféromètres Fabry Péroth accordables.

Chapitre 2

Etat de l'art des technologies de fabrication et performances des filtres Fabry Pérot intégrés

Dans ce chapitre, je décris d'abord le principe de fonctionnement des filtres Fabry Pérot. Ensuite je présenterai un état de l'art montrant quelques exemples de filtres Fabry Pérot micro-usinés. En conclusion de cet état de l'art, je présenterai les technologies de fabrication retenues pour réaliser la matrice de filtres accordables.

2.1 Principe de fonctionnement d'un Fabry Péro

Les cavités Fabry Péro sont des filtres de type interférentiel permettant de filtrer la lumière soit par réflexion, soit par transmission de la lumière incidente (figure 2.1a). La cavité est constituée de deux miroirs semi-réfléchissants mis face à face, dont le parallélisme et le gap d'air sont rigoureusement contrôlés (figure 2.1b).

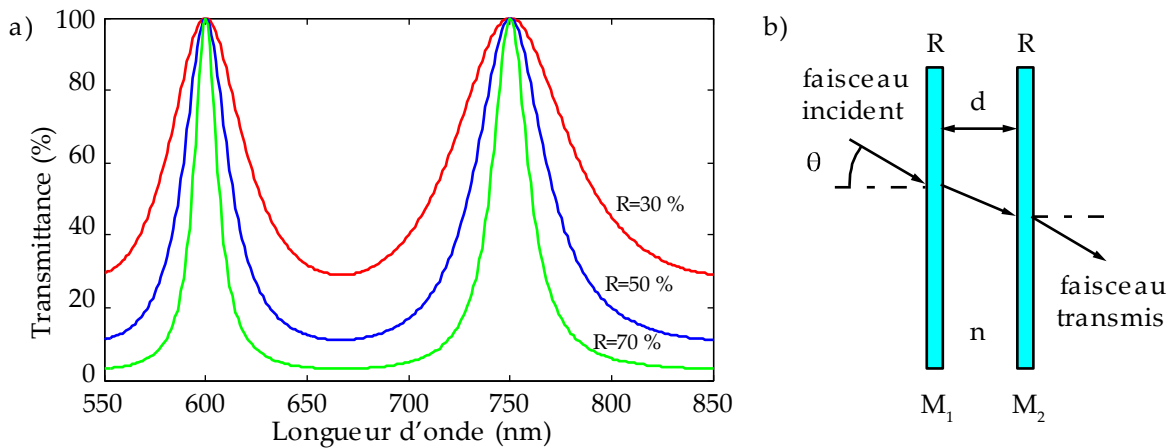


Figure 2.1 : a) Figure de transmittance d'un filtre Fabry Péro en fonction de la réflectance des miroirs.

b) Schéma d'un Fabry Péro constitué de deux miroirs de réflectance R .

Le filtrage d'une cavité Fabry Péro est le résultat d'interférences qui se forment en sortie de la cavité. A l'intérieur de la cavité, les réflexions multiples du faisceau incident cumulent un déphasage. Pour chaque aller-retour dans la cavité, la valeur du déphasage acquis dépend de la longueur d'onde, de l'angle incident, de la distance, et de l'indice de réfraction du milieu se trouvant entre les deux miroirs. A la sortie de la cavité, la superposition des faisceaux ayant subi des réflexions multiples forme des interférences destructives ou constructives, qui limitent les longueurs d'ondes transmises ou réfléchies. La théorie correspondante sera analysée dans la partie 3.1.1 (p49).

Il existe trois méthodes permettant d'ajuster la longueur d'onde filtrée par une cavité Fabry Péro :

- incliner le filtre pour changer l'angle incident des faisceaux ;
- changer l'indice de réfraction entre les deux miroirs ;
- changer l'espacement entre les deux miroirs.

La première méthode a pour inconvénient de nécessiter des angles d'incidence importants pour permettre un ajustement sur une large gamme de longueurs d'onde, elle ne permet donc pas une intégration facile sur un MOEMS.

La seconde méthode utilise souvent des composants sensibles à la polarisation et aux variations de températures ; de plus, les matériaux disponibles pour les différentes gammes de longueur d'onde sont limités, ce qui rend la solution peu polyvalente.

A l'inverse de ces deux premières méthodes d'ajustement, la troisième méthode offre l'avantage d'atteindre pratiquement 100 % de transmission, et d'être insensible à la polarisation de la lumière incidente ; de plus elle ne requiert que de faibles variations du gap d'air, typiquement de l'ordre de quelques centaines de nanomètres. En revanche, cette méthode a l'inconvénient majeur de nécessiter des miroirs extrêmement plats, peu rugueux, et les gap d'air et parallélisme des miroirs doivent être contrôlés au nanomètre près.

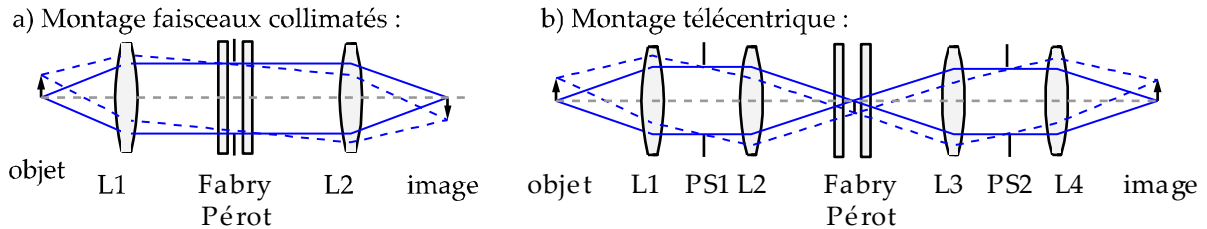


Figure 2.2 : Schémas de deux montages optiques utilisés pour de l'imagerie spectrale avec des filtres Fabry Péro [Kentischer 1998].

Pour faire de l'imagerie spectrale avec un filtre Fabry Péro, deux types de montages optiques sont possibles (cf. figure 2.2) [Kentischer 1998] :

Dans un montage à faisceaux collimatés (figure 2.2a), le filtre Fabry Péro est placé dans le faisceau collimaté. Dans ce montage, l'angle des faisceaux incidents dépendra de la taille de l'objet et de la focale de la lentille L1 ; cela a pour inconvénient d'introduire une variation de la longueur d'onde filtrée au fur et à mesure que l'on s'écarte de l'axe optique du montage. Les défauts des miroirs (planéité, parallélisme) auront pour conséquence d'élargir les pics de transmittance et d'abaisser la transmittance du filtre.

Dans un montage télécentrique (figure 2.2b), le filtre Fabry Péro est placé à proximité du plan image formé par la première série de lentilles. Une seconde série de lentilles est utilisée pour reformer l'image de l'objet sur le capteur d'imagerie. Dans ce montage, les faisceaux incidents (qui forment l'image au niveau du filtre) arrivent sur le Fabry Péro avec le même angle ; il n'y a plus de variation de la longueur d'onde filtrée lorsque l'on s'écarte de l'axe optique du système, mais les défauts de planéité et de parallélisme des miroirs auront pour conséquence de modifier la longueur d'onde filtrée au niveau de chaque point de l'image, un peu comme sur le Fabry Péro de la figure 2.3, où différentes teintes sont visibles.

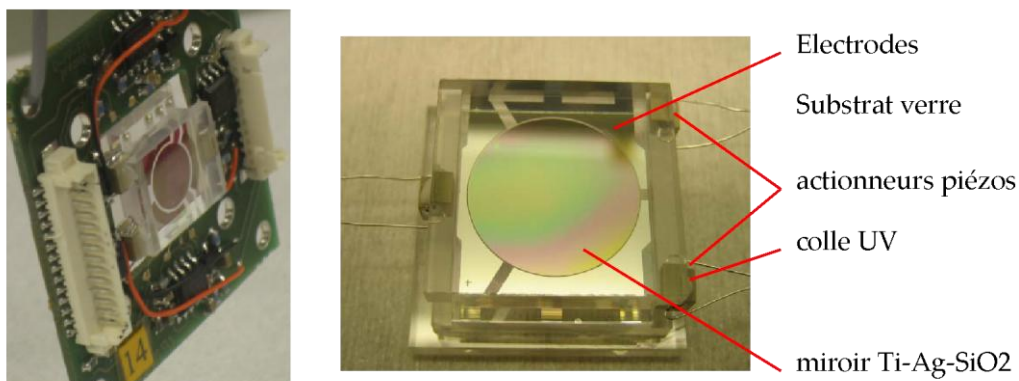


Figure 2.3 : Exemple de filtre Fabry Péro de 7 mm de diamètre obtenu en assemblant deux miroirs et trois actionneurs piézos avec de la colle UV. [Saari 2009]

Le Fabry Péroto développé dans cette thèse utilisera un montage optique avec faisceaux collimatés, et aura des gaps d'air de l'ordre du micron. Cette valeur du gap d'air est beaucoup plus faible que les gaps d'air de plusieurs millimètres des filtres Fabry Péroto utilisés en laboratoire ou en astronomie [Berrilli 2011]. Ainsi, dans notre montage, le faible gap d'air, couplé à une lentille de focale suffisamment élevée, nous permettra de limiter l'élargissement de la transmittance causé par la variation des angles d'incidence. De plus, tous les défauts de planéité et de parallélisme des miroirs se traduiront par un élargissement des pics de transmittance, et non par une variation localisée de la longueur d'onde filtrée.

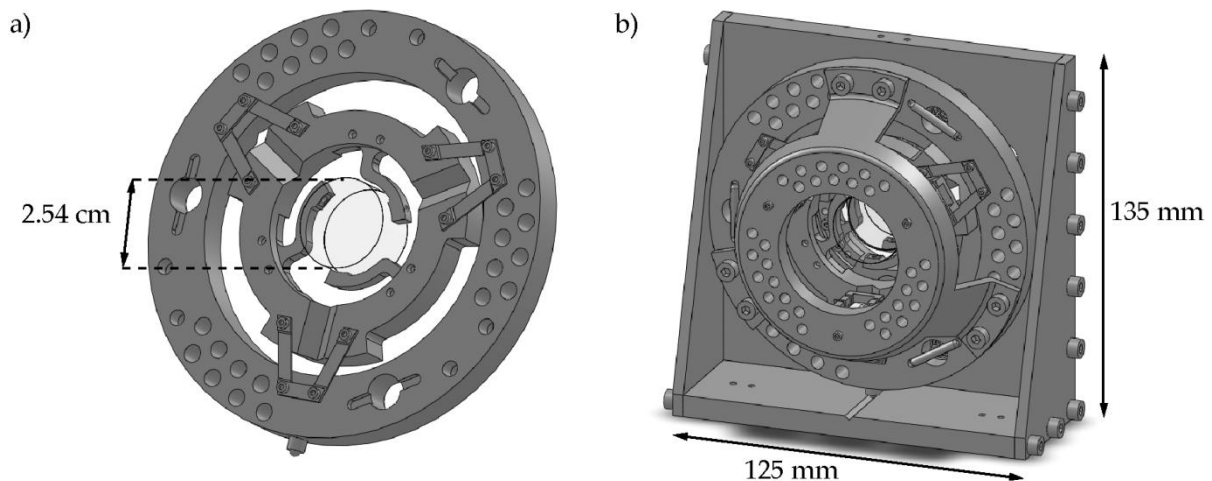


Figure 2.4 : Premier prototype de laboratoire d'un Fabry Péroto accordable fabriqué pour vérifier la faisabilité d'un filtre embarqué sur satellite. [Berrilli 2011 ; Giovannelli 2012]

Dans la littérature, les Fabry Péroto possédant des diamètres de l'ordre du millimètre ou du centimètre sont souvent assemblés à la main [Berrilli 2011 ; Giovannelli 2012 ; Saari 2009]. Par exemple, sur la figure 2.3, deux morceaux de miroirs et des actionneurs piézoélectriques sont utilisés pour obtenir un Fabry Péroto accordable très compact [Saari 2009].

L'avantage majeur de l'assemblage manuel est de supprimer toutes les limitations qui existent dans un procédé de fabrication par micro-usinage. De plus cette méthode permet de sélectionner un support des miroirs assurant la planéité désirée. Cependant, cette technologie de fabrication n'est pas collective et l'encombrement est a priori incompatible avec la réalisation de matrices de filtres ajustables individuellement avec un taux de remplissage élevé. C'est pourquoi nous avons utilisé des techniques de microfabrication pour obtenir une matrice Fabry Péroto suffisamment compacte pour occuper la même surface que le capteur d'imagerie. Dans la partie qui suit, j'explique les principales limitations des procédés de micro-usinage.

2.2 Limitations des méthodes de micro-fabrication

Les microsystèmes électromécaniques optiques (Optical MEMS) et les microsystèmes optoélectromécaniques (MOEMS) sont des systèmes micro-usinés intégrant des microstructures mécaniques mobiles ou déformables et réalisant ou intégrant des fonctions optiques. Ils sont apparus au milieu des années 90. Les produits commerciaux phares les plus connus de la technologie MOEMS sont les micro-miroirs digitaux utilisés dans les vidéoprojecteurs DLP, dont le développement a été initié par la société Texas Instruments [Douglass 2003 ; Dudley 2003]. Le marché des MOEMS reste encore très fortement dominé par les applications d'affichage, mais de nombreux autres produits ont été fabriqués en séries plus réduites et beaucoup de démonstrateurs de laboratoire ont été développés. On peut par exemple citer : les micro-bolomètres [Martino 2012], les micro-miroirs adaptatifs [Fernandez 2003 ; Zamkotsian 2003], les modulateurs, commutateurs, filtres, atténuateurs, et sources ou détecteurs accordables pour les télécommunications [Wu 2006], les micro-capteurs et résonateurs avec actionnement ou/et détection optique [Graebner 2002 ; Hall 2008 ; Nieva 2009 ; Zhang 2007], les micro-instruments et micro-bancs optiques [Bargiel 2010 ; Lin 1994 ; Motamedi 1997], etc... Les MOEMS semblent pouvoir tout faire, mais il faut garder à l'esprit que leurs principales limitations sont inhérentes au procédé de fabrication.

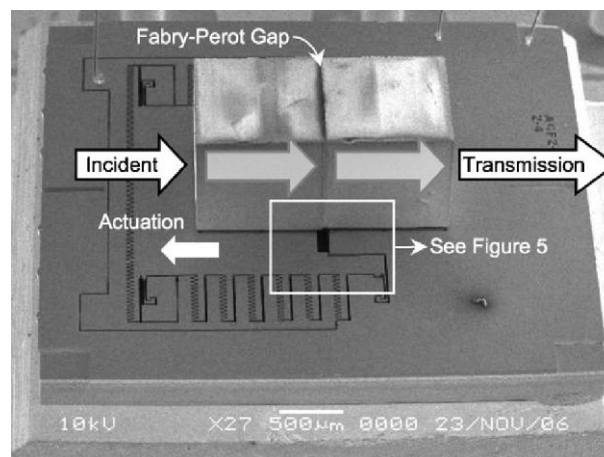


Figure 2.5 : Exemple de filtre Fabry Pérot réalisé par assemblage de miroirs (les cubes) sur une plateforme MEMS utilisée pour faire varier le gap d'air. [Yamanoi 2008]

Le choix des filtres Fabry Pérot est justifié par leurs propriétés optiques, mais il est nécessaire de bien analyser les avantages et les limitations des procédés de microfabrication pour sélectionner le procédé le mieux adapté :

Premièrement, les procédés de microfabrication ne permettent souvent qu'une fabrication de structures 2D situées dans le plan du wafer, ceci rend donc difficile l'utilisation de miroirs verticaux. En effet, le principe de base de la microfabrication se résume souvent à déposer un empilement de couches fines, qui sont ensuite structurées à l'aide d'un masque en résine et d'une technique de gravure sèche ou humide. Les épaisseurs des couches dépassent

rarement le micron, cela signifie que pour fabriquer un filtre de plusieurs millimètres de diamètre, il faudra le fabriquer dans le plan du wafer.

Cependant, il reste possible de faire des montages optiques fonctionnant hors plan comme sur la figure 2.5 [Yamanoi 2008], mais là encore, on retombe sur des problèmes d'assemblage qui annuleraient l'intérêt d'utiliser des méthodes de micro-fabrication.

Plus récemment, plusieurs exemples de Fabry-Pérot avec des miroirs verticaux ont été réalisés à l'ESIEE par gravure profonde [Malak 2011a ; Malak 2011b ; Saadany 2006]. Ces filtres utilisent des miroirs Si/Air. Pour réaliser ces filtres, le challenge a été d'obtenir des gravures à très haut rapport d'aspect, car les couches d'air ne mesurent que $3.49 \mu\text{m}$ de large. Néanmoins, bien qu'ayant un coefficient de qualité très élevé ($Q = 8818$), le diamètre de ces filtres est trop faible ($10\text{-}50 \mu\text{m}$) pour pouvoir être utilisé pour de l'imagerie.

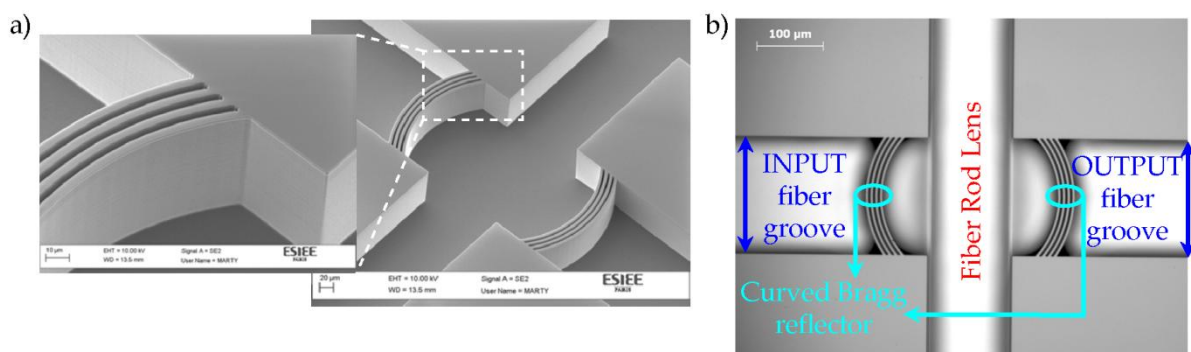


Figure 2.6 : Exemple de filtre Fabry Pérot ayant des miroirs incurvés Si/Air ($3.67/3.49 \mu\text{m}$). [Malak 2011a ; Malak 2011b]

Deuxièmement, la course d'actionnement est typiquement limitée à quelques dizaines de microns. En effet, il existe plusieurs méthodes d'actionnement (thermique, magnétique, électrostatique, et piézoélectrique [Kaajakari 2009]). L'actionnement électrostatique est le plus utilisé en raison de sa simplicité et de son insensibilité aux variations de température. Mais, dans le cas de deux électrodes en vis à vis, il est limité à des courses d'actionnement faibles à cause des tensions d'actionnement nécessaires (qui augmentent rapidement avec l'écart entre électrodes), et à cause du phénomène de "Pull-in" (instabilité électromécanique limitant la course à $1/3$ du gap initial cf. partie 3.2.2 p75). Il existe des solutions pour obtenir des courses plus importantes telles que l'utilisation de peignes verticaux, de leviers,... mais au prix d'un encombrement important incompatible avec le taux de remplissage élevé exigé par notre cahier des charges. Une course importante peut être obtenue en exploitant la résonance mécanique (cf. figure 2.7) [Sandner 2009], mais ceci n'est exploitable qu'en régime dynamique.

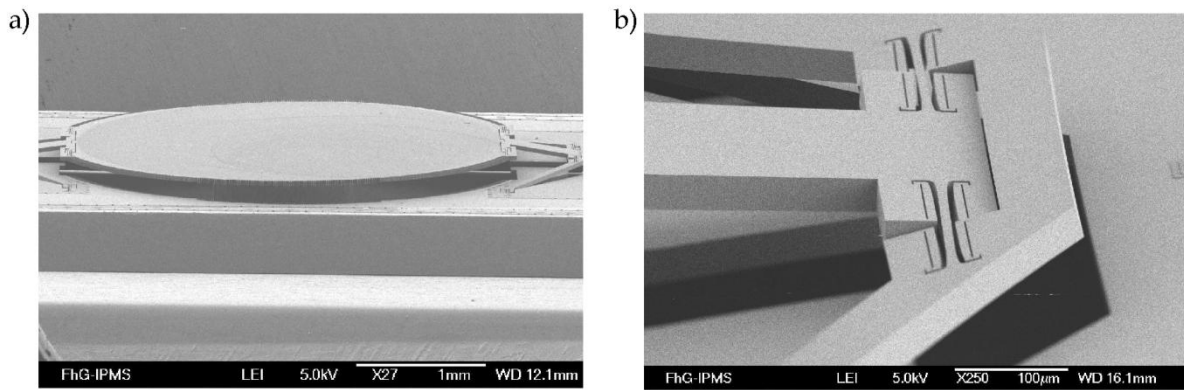


Figure 2.7 : Exemple de structure actionnée par voie électrostatique et possédant une grande amplitude de déplacement hors plan. Dans cet article [Sandner 2009], la structure ne peut pas maintenir le miroir à une position fixe, il est nécessaire de faire osciller la structure à sa fréquence de résonance pour obtenir des mouvements de grande amplitude. a) Vue d'ensemble montrant le miroir, les auteurs ont pu atteindre $\pm 240 \mu\text{m}$ de déplacement. b) Détail du ressort.

Troisièmement, la fabrication d'un MOEMS est très souvent limitée par la compatibilité des méthodes de fabrication. En effet, il est possible de fabriquer la plupart des composants optiques usuels comme des lentilles [Bourouina 2004 ; Motamedi 1997], des polariseurs [Tyan 1997], des réseaux de diffraction [Tormen 2006], etc... Mais l'intégration de ces différents composants sur une structure mobile est difficile. Les principales limitations proviennent de la compatibilité chimique et en température des différents composants du MOEMS. Par exemple, certains développeurs de résines photosensibles (utilisées pour les couches de masquage) peuvent endommager les couches métalliques ; ou encore certains dépôts ne se font qu'à des températures élevées (300-1100 °C) incompatibles avec les matériaux présents.

Toutes ces contraintes sont donc à considérer tout au long du processus de conception du MOEMS. Dans la partie qui suit, je présente les principales méthodes de micro-fabrication qui ont été jusqu'ici utilisées pour fabriquer des filtres Fabry Péroต์ micro-usinés.

2.3 Filtres Fabry Pérot micro-usinés

Les deux principales méthodes de fabrication des micro-interféromètres Fabry Péro utilisés dans la littérature sont le micro-usinage de surface (dépôt/structuration de couches fines) et le micro-usinage de volume (gravure du wafer en silicium) qui peuvent éventuellement être combinés (cf. figure 2.8). Chacune des deux méthodes présente des avantages et des inconvénients décrits dans la suite.

De très nombreux travaux ont été publiés depuis le milieu des années 90 sur l'intégration monolithique, horizontale, ou verticale (3D) de cavités Fabry Péro ajustables. Dans la très grande majorité des cas, les miroirs sont de petite taille (< 1 mm de diamètre), la course d'actionnement est assez réduite (< 1 μ m) et le domaine de longueur d'onde considéré est dans le proche ou le moyen infrarouge, ce qui permet l'utilisation de miroirs fabriqués avec des matériaux semi-conducteurs. Dans cette partie, nous ne présenterons pas un état de l'art exhaustif, mais nous exposerons les principales méthodes de fabrication qui ont été utilisées pour intégrer des filtres Fabry Péro accordables (par translation hors du plan du substrat).

Les deux principales méthodes utilisées par différents auteurs pour fabriquer des filtres Fabry Péro accordables (cf. figure 2.8) sont le micro-usinage de surface, et le micro-usinage de volume. Chacune des deux méthodes présente des avantages et des inconvénients décrits dans la suite.

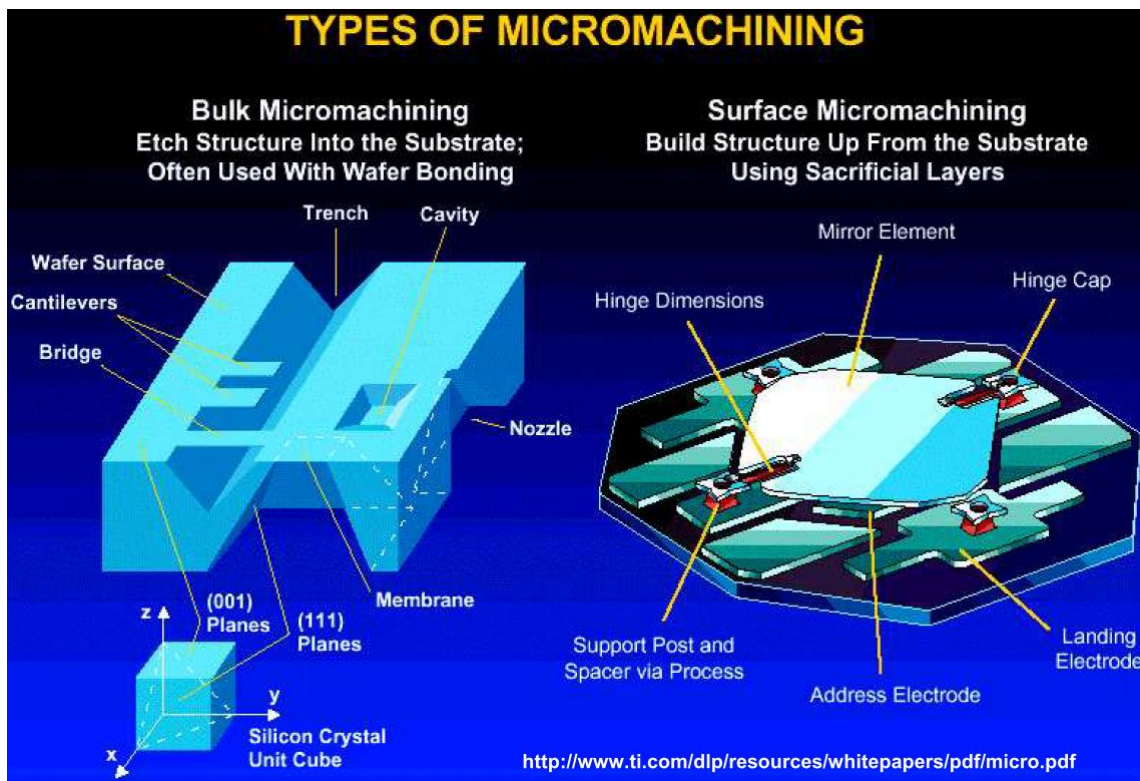


Figure 2.8 : Schéma montrant les différences entre le micro-usinage de volume (à gauche), et le micro-usinage de surface (à droite).

2.3.1 Micro-usinage de surface

Le micro-usinage de surface consiste à déposer de fines couches de matériaux, lesquelles font rarement plus de quelques microns d'épaisseur, et sont sans structuration en profondeur du wafer. Les dépôts peuvent être réalisés par pulvérisation, évaporation, dépôt électrolytique, chimique, ou assisté par plasma. La structuration des couches peut être faite à l'aide d'une couche de masquage (souvent en résine), ou directement pendant le dépôt à l'aide d'un pochoir (qui peut être en résine ou en silicium). Dans la littérature, la grande majorité des filtres Fabry Péroต์ micro-usinés sont réalisés par cette méthode de fabrication, car elle est simple à mettre en œuvre et permet une intégration directe du filtre sur le capteur [Keating 2008].

Cependant, premier inconvénient, la plupart des filtres Fabry Péroต์ réalisés à l'aide de cette méthode sont dépourvus de cadre rigide permettant de garantir la planéité des miroirs : de ce fait pour que les déformations des miroirs ne soient pas trop importantes, il faut souvent utiliser des miroirs de petite taille. Par exemple : 90 μm de diamètre sur la figure 2.9 [Keating 2008], ou 200 μm sur la figure 2.10 [Stupar 2009]. Cette contrainte met en évidence l'une des principales difficultés dans la fabrication d'un Fabry Péroต์, qui est d'obtenir des miroirs possédant une planéité de l'ordre de la dizaine de nanomètres sur toute leur surface. Or dans le cas des filtres Fabry Péroต์ fabriqués par micro-usinage de surface, la planéité des miroirs est difficile à contrôler à cause de la faible épaisseur des couches, des défauts de planéité des wafers, des contraintes résiduelles (moyenne et gradient), et des contraintes thermomécaniques liées à la différence des coefficients de dilatation thermique entre les différents matériaux.

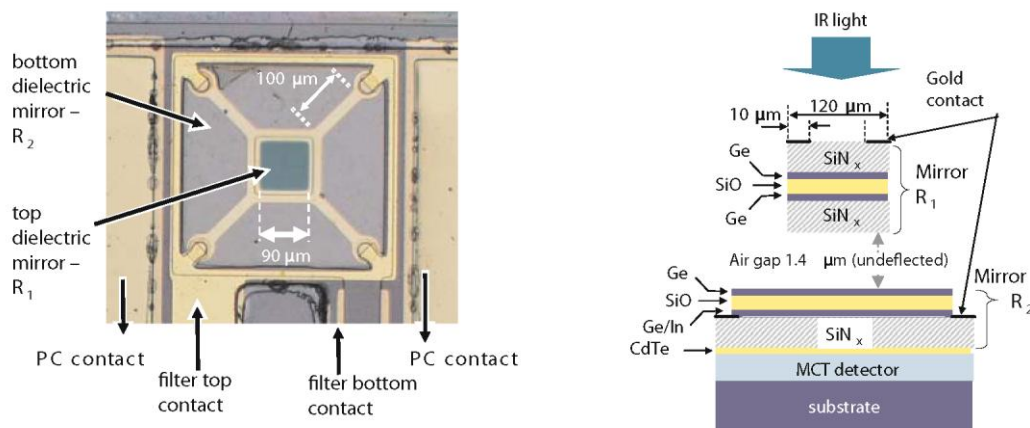


Figure 2.9 : Exemple de filtre Fabry Péroต์ réalisé par micro-usinage de surface. [Keating 2008]

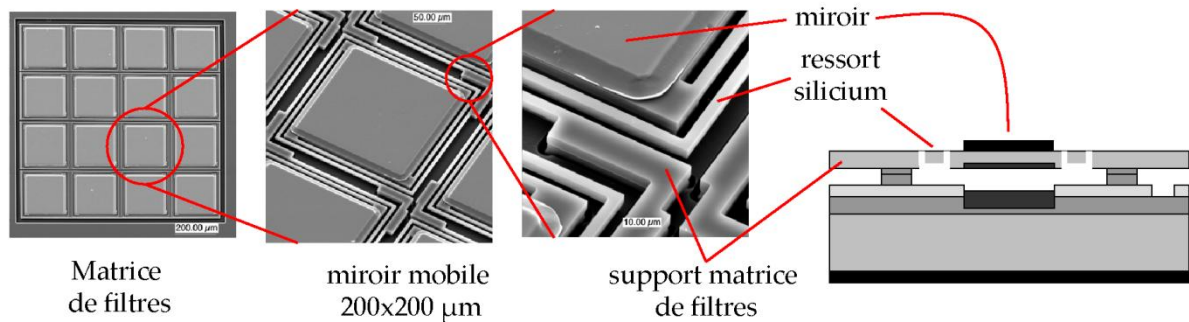


Figure 2.10 : Exemple d'une matrice de filtres Fabry Péroét réalisé par micro-usinage de surface, conçue pour fonctionner à 77°K dans le domaine infrarouge moyen et lointain. [Stupar 2009]

Par exemple, la matrice de filtres Fabry Péroét visible sur la figure 2.10 a été développée par Stupar et al. [Stupar 2009]. Cette matrice a été fabriquée par report d'une fine couche de silicium ($12\ \mu\text{m}$) d'un wafer de type SOI sur un wafer possédant les miroirs fixes. Pour amincir le wafer SOI, le procédé de fabrication a utilisé des techniques de micro-usinage de volume ; Cependant, ce Fabry Péroét peut être classé dans la catégorie du micro-usinage de surface, car pour pouvoir être utilisé dans le domaine des infrarouges moyen et lointain, les auteurs ont eu besoin d'utiliser des multicouches d'une dizaine de microns d'épaisseur, presque autant que la couche de silicium servant à former la structure mobile. Cette faible différence d'épaisseur entre la structure en silicium et le miroir a obligé les auteurs à contrôler la contrainte résiduelle de la couche anti-réfléchissante, de manière à obtenir une déflexion de seulement 10 nm à 77°K (la température de fonctionnement de leur filtre) ; par comparaison, à température ambiante, les miroirs possèdent une déflexion de 80 nm.

Second inconvénient, pour fixer le gap d'air initial, ces Fabry Péroét requièrent souvent une couche sacrificielle d'épaisseur et de rugosité contrôlées. L'épaisseur de la couche sacrificielle peut être élevée, car elle correspond au gap maximum si un actionnement électrostatique, toujours attractif, est utilisé.

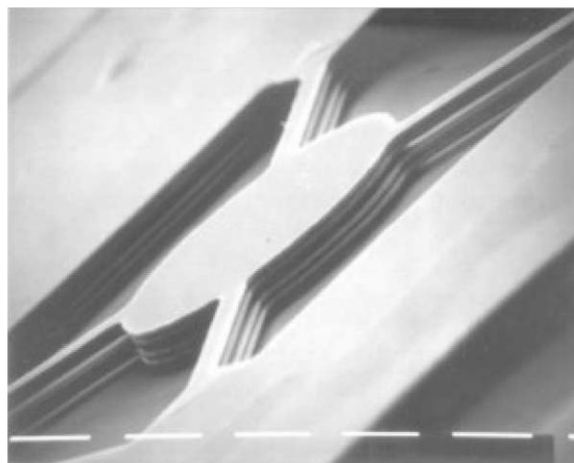


Figure 2.11 : Exemple de filtre Fabry Péroét réalisé par sous-gravure d'une couche métallique en InGaAs. Le miroir multicouche est constitué d'un empilement air / InP. Le contraste d'indice élevé donne des miroirs possédant une réflectance élevée de 96-98 %, dans une gamme de 1.55 à 1.9 μm . [Bondavalli 2001 ; Seassal 1996]

La couche sacrificielle est typiquement déposée sur le miroir fixe, et est souvent constituée d'un polymère [Blomberg 2010 ; Keating 2008 ; Rissanen 2012], mais elle peut aussi être un semi-conducteur (cf. figure 2.11) [Bondavalli 2001], un métal, ou un diélectrique [Winchester 2001]. Le miroir mobile est ensuite déposé sur la couche sacrificielle. Cette couche déterminant à la fois la planéité et la rugosité initiale du miroir mobile, Il faut qu'elle soit elle-même peu rugueuse et homogène en épaisseur à quelques (dizaines) de nanomètres près. La couche sacrificielle est ensuite sous-gravée pour libérer le miroir mobile.

Le troisième inconvénient du micro-usinage de surface est de nécessiter une sous gravure de la couche sacrificielle pour libérer le miroir mobile. Dans le cas d'une gravure humide, les forces capillaires apparaissant lors du séchage peuvent poser un problème de stiction si la surface sous gravée est importante et le gap faible. De plus la sous gravure ne peut pas se faire sur des distances importantes en un temps raisonnable. Pour limiter la durée de sous-gravure, il est typiquement nécessaire de réaliser des trous d'accès régulièrement espacés sur les miroirs. Non seulement ces ouvertures sont nuisibles d'un point de vue optique, mais encore elles peuvent facilement conduire à des défauts de planéité à cause des contraintes résiduelles dans le(s) film(s) constituant le miroir mobile.

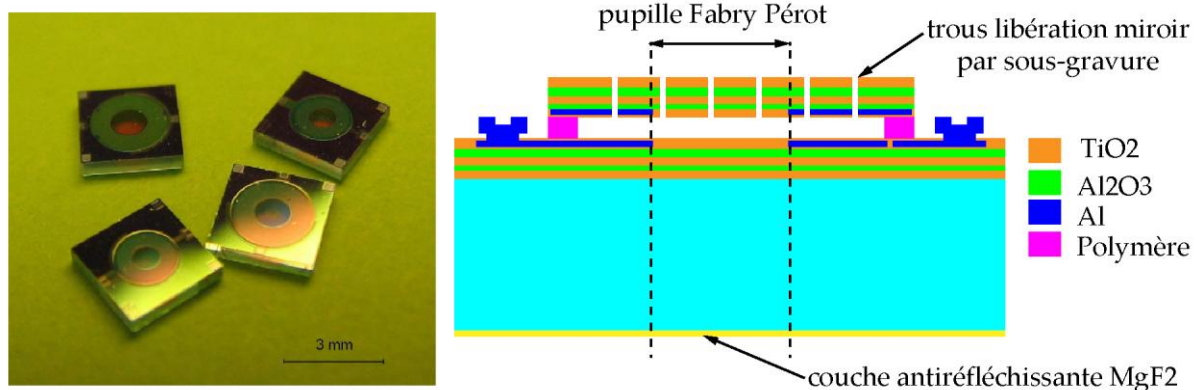


Figure 2.12 : Micro-interféromètre réalisé par micro-usinage de surface avec une couche sacrificielle en polymère. [Blomberg 2010]

Malgré toutes ces difficultés, il reste possible de réaliser par micro-usinage de surface des filtres Fabry Péroth de grande dimension. Par exemple, dans [Blomberg 2010 ; Rissanen 2012], les auteurs ont fabriqué avec succès des filtres Fabry Péroth possédant une pupille faisant 1 à 2 mm de diamètre (figure 2.12), ce qui est bien supérieur aux autres filtres Fabry Péroth cités jusqu'à présent. A la place d'une structure suspendue par des ressorts, les auteurs ont utilisé une membrane pleine. Les électrodes d'actionnement sont déposées sur la membrane, ce qui permet de la tendre par actionnement électrostatique. Pour l'accordabilité des filtres, le faible gap d'air permet d'utiliser une tension d'actionnement inférieure à 30V, et d'ajuster ainsi le gap d'air entre 1300 nm et 850 nm (course totale 450 nm).

D'un point de vue optique, les résultats de cette publication montrent que l'épaisseur du polymère (utilisé comme couche sacrificielle) est assez bien contrôlée, car sur 3 puces

différentes prises en différents endroits du wafer, la position du pic de transmission au repos est identique, à quelques nm près. Les auteurs ont utilisé des miroirs diélectriques multicouches, composés de TiO_2 et d' Al_2O_3 . Une configuration du miroir de type $\lambda/4$ a permis aux auteurs d'obtenir des réflectances élevées. Cela se traduit donc par des pics de transmittance très fins, ayant une largeur à mi-hauteur d'environ 4-9 nm. Cependant, les empilements de type $\lambda/4$ ne permettent pas de contrôler la réflectance sur une large gamme de longueur d'onde ; ainsi, les filtres Fabry Péroต์ de cette publication sont limités à une gamme d'environ 200 nm de large dans le visible. C'est pourquoi, dans cette publication, les auteurs ont dimensionné plusieurs miroirs, adaptés chacun à différentes gammes de longueur d'onde. La transmittance des filtres varie selon les versions : entre 80 et 60 % (560-760 nm) ou entre 90 et 30 % (375-525 nm).

La méthode de fabrication employée dans cet article présente toutefois quelques inconvénients. Par exemple, à cause de la rigidité de la membrane, la course maximale d'ajustement est limitée. De plus, à cause des trous présents au sein même du miroir (utilisés pour permettre la sous-gravure), les auteurs rapportent que la course d'actionnement doit être restreinte pour éviter de déchirer la membrane. Selon des travaux de Han et al. [Han 2000], l'utilisation d'ondulations placées sur la membrane en périphérie de la pupille permettrait de diminuer sa rigidité. Mais d'après l'article de Han et al. [Han 2000] et un autre article de Kressman et al. [Kressmann 2002], la présence d'ondulations sur une membrane modifie l'équilibre des contraintes résiduelles, ce qui peut causer une déformation non désirée au reste de la membrane. Donc pour pouvoir utiliser des ondulations, il faudrait prévoir un cadre rigide servant à maintenir à plat le miroir.

En conclusion, la majorité des articles visant la réalisation de filtres Fabry Péroต์ miniaturisés utilisent le micro-usinage de surface car cette méthode de fabrication permet d'intégrer les filtres directement sur les capteurs. Cependant, l'absence de cadre rigide limite le diamètre des filtres à une centaine de microns (voire 1-2 mm), et rend la planéité des miroirs difficile à contrôler sur de grandes surfaces. L'utilisation de ces filtres est donc souvent limitée à la spectroscopie et ne permet pas de faire de la spectro-imagerie. C'est pourquoi cette technique de fabrication n'a pas été retenue pour réaliser ma matrice de filtres.

Dans la partie suivante, est examinée la seconde méthode, le micro-usinage de volume, qui permet de fabriquer des filtres Fabry Péroต์ de grand diamètre.

2.3.2 Micro-usinage de volume

Le micro usinage de volume exploite une gravure profonde, typiquement de part en part d'un wafer. Cette méthode de structuration permet donc de découper des ressorts et de fabriquer un cadre rigide mobile. Il faut cependant déposer les deux miroirs sur deux wafers différents, qui devront ensuite être assemblés pour obtenir un Fabry Péroto.

Dans cette partie, trois méthodes de gravure profonde sont discutées : la gravure isotrope humide, la gravure anisotrope humide, et la gravure anisotrope sèche.

2.3.2.1 Gravure isotrope humide

La gravure isotrope humide permet de graver un matériau avec la même vitesse de gravure dans toutes les directions. Cette méthode de structuration a rarement été utilisée pour fabriquer des filtres Fabry Péroto. Une exception est le dispositif réalisé par Gupta et al. [Gupta 2012]. Dans cette publication, les auteurs ont utilisé deux wafers en verre (figure 2.13), sélectionnés pour leur transparence dans le visible.

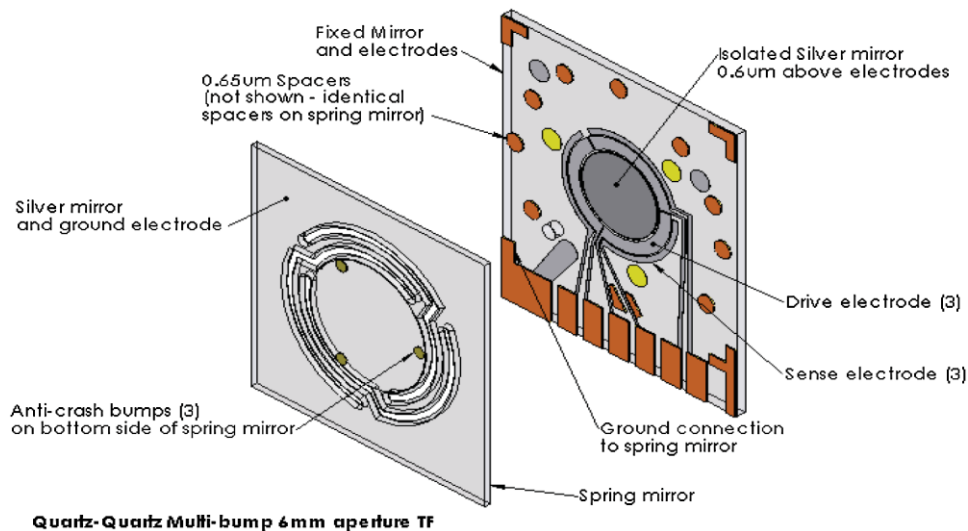


Figure 2.13 : Exemple de filtre Fabry Péroto faisant 6 mm de diamètre, réalisé par gravure isotrope humide d'un wafer en verre. [Gupta 2012]

La structuration du miroir mobile a été réalisée en utilisant un masque en silicium amorphe déposé par LPCVD, et une gravure avec de l'acide fluorhydrique. Le procédé de fabrication présenté dans cet article est simple, mais nécessite une gravure isotrope de part en part d'un wafer en verre de 450 μm d'épaisseur. Une telle profondeur de gravure nécessite des ressorts suffisamment larges pour permettre 200 à 300 μm de sous-gravure de part et d'autre du ressort.

Ce procédé de fabrication n'est pas adapté à la réalisation de la matrice de filtres, car pour maximiser la couverture des miroirs, les ressorts doivent occuper le minimum de surface. Les gravures anisotropes humides présentées dans la partie suivante permettent par contre de faire des structures plus compactes.

2.3.2.2 Gravure anisotrope humide

La gravure anisotrope humide utilise des produits chimiques donnant des vitesses de gravure qui dépendent de l'orientation cristalline des wafers. Plusieurs produits chimiques permettent une gravure anisotrope du silicium. Les plus fréquemment utilisés sont : l'hydroxyde de potassium (KOH), et le tétraméthylammonium hydroxyde (TMAH). Ces deux produits gravent rapidement les plans cristallins orientés (110) et (100), alors que les plans cristallins orientés (111) ne sont presque pas gravés. Cette sélectivité de la gravure permet d'obtenir des flancs lisses qui seront inclinés à 54.74° sur des wafers (100) (figure 2.14a), et à 90° sur des wafers (110) (figure 2.14b).

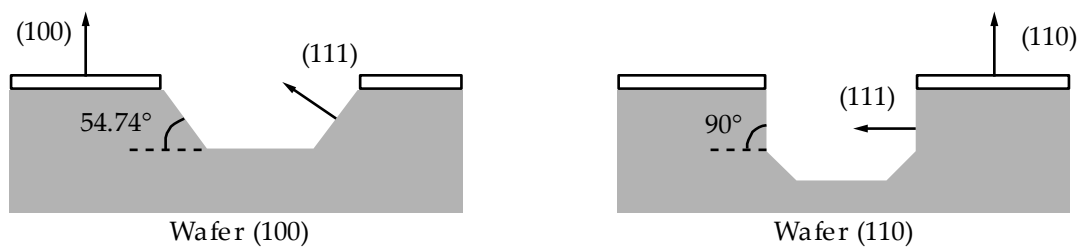


Figure 2.14 : inclinaison des flancs de gravure KOH.

L'avantage de cette méthode de gravure est de d'être peu coûteuse, et de fournir un fond et des flancs lisses. Cela permet par exemple d'amincir le wafer par gravures successives pour former des ressorts (cf. figure 2.15) [Neumann 2008], car l'absence de rugosité limite fortement l'apparition d'amorces de rupture.

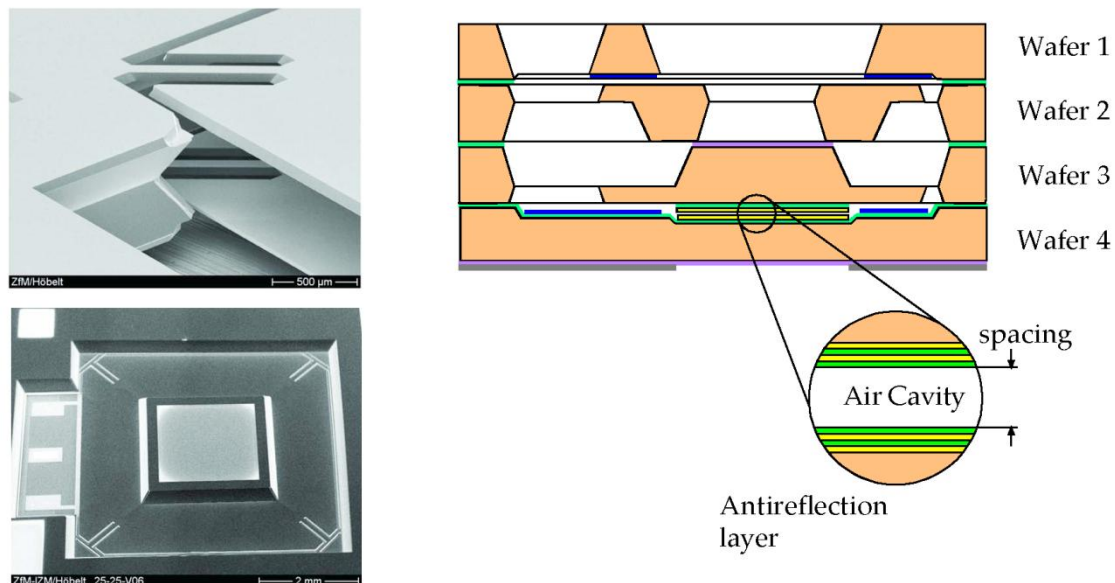


Figure 2.15 : Exemple de filtre Fabry Pérot de 2 mm de côté, réalisé par micro-usinage de volume, à l'aide de plusieurs gravures anisotropes humides utilisant du KOH. [Neumann 2008]

Un procédé de fabrication plus court, nécessitant une seule gravure KOH, est aussi réalisable en utilisant une membrane à la place de ressorts (cf. figure 2.16). La membrane peut être lisse [Bartek 1999 ; Correia 1999], ou ondulée pour diminuer sa rigidité [Jerman 1991]. En effet,

contrairement aux Fabry Pérots réalisés par micro-usinage de surface, la présence d'un cadre rigide obtenu par gravure KOH permet l'utilisation d'ondulations tout en maintenant la planéité des miroirs.

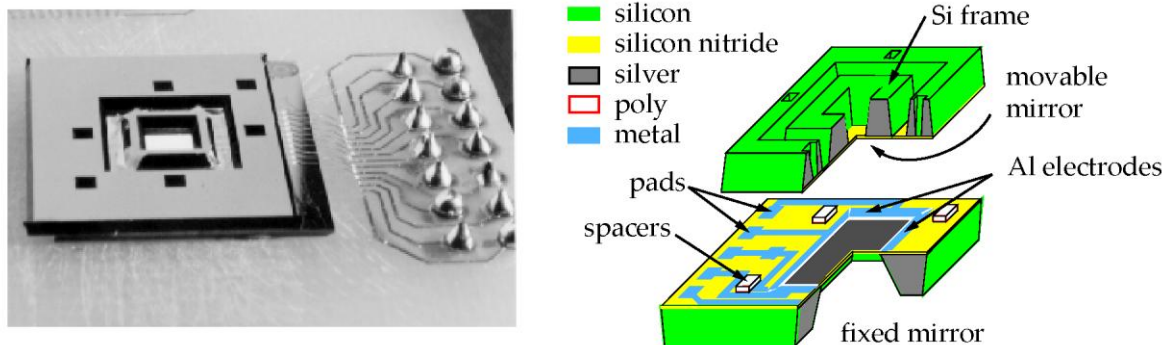


Figure 2.16 : Second exemple de filtre Fabry Pórot de 2 mm de côté, réalisé par micro-usinage de volume, à l'aide d'une gravure KOH. Les deux miroirs sont des membranes en nitrure de silicium sur lesquelles a été déposée une fine couche de 40 nm d'argent. Ce filtre utilise une membrane en nitrure de silicium à la place des ressorts. [Correia 1999]

Cependant, les gravures anisotropes humides présentent plusieurs inconvénients qui nous empêchent de les utiliser pour la fabrication d'une matrice de filtres :

Premier inconvénient, les masques en résine ne résistent pas au KOH ; pour protéger le silicium (et aussi les miroirs), il faut utiliser un masque en nitrure de silicium ou en silice (le nitrure de silicium résistant mieux que la silice). Or la couche de silice ou de nitrure peut s'avérer difficile à retirer de manière sélective sans endommager les miroirs. Ainsi, par exemple dans [Bartek 1999 ; Correia 1999] les miroirs en argent, déposés avant la gravure KOH, ont dû pour celle-ci être protégés par un support étanche. Dans [Neumann 2008], les miroirs diélectriques sont déposés en dernier, après toutes les étapes de gravure KOH, ce qui nécessite une propreté exemplaire et un minimum de rugosité.

Deuxième inconvénient, la vitesse de gravure dépend des orientations cristallines du silicium, donc la forme de la structure sera fixée par l'orientation du wafer. Par exemple, l'utilisation de wafers (110) permet d'obtenir des flancs verticaux à 90° , mais la structure gravée n'est pas un parallépipède rectangle car les plans (111) forment entre eux un angle de 109.5° . Les wafers de type (100) permettent de graver des ouvertures rectangulaires, car les plans (111) forment des angles de 90° , mais les plans (111) sont inclinés à 54.74° par rapport à la surface (figure 2.14a). Ce qui nous amène au troisième inconvénient.

Troisième inconvénient, pour les wafers d'orientation (100), l'inclinaison des flancs (plans (111)) conduit à la perte d'une grande surface pour des gravures traversant tout le wafer. Par exemple, sur un wafer de $300\ \mu\text{m}$ d'épaisseur, pour percer une ouverture de $100\ \mu\text{m}$ de large en face avant, il faut prévoir une ouverture de $524\ \mu\text{m}$ de large sur la face arrière, soit une perte de $212\ \mu\text{m}$ de part et d'autre de l'ouverture. Notons que cette perte d'espace peut être divisée par deux en gravant simultanément la face avant et la face arrière du wafer.

En conclusion, la gravure chimique anisotrope du silicium n'est pas adaptée à la fabrication de matrices de filtres Fabry Péroet à cause de l'espace perdu et des contraintes imposées par les couches de masquage. La partie suivante présente la méthode de gravure anisotrope sèche, qui est moins contraignante.

2.3.2.3 Gravure anisotrope sèche (DRIE)

La gravure ionique réactive profonde (DRIE : Deep Reactive Ion Etching) est une gravure sèche par plasma. Le procédé Bosch, schématisé dans la figure 2.17) est typiquement utilisé pour obtenir une gravure profonde du silicium avec des flancs verticaux. Ce type de procédé utilise une série de cycles courts alternant une étape de passivation (figure 2.17b) du silicium, et une étape de gravure isotrope (figure 2.17c). De cette manière il est possible d'obtenir des flancs de gravure presque verticaux, possédant un très haut rapport d'aspect largeur/profondeur d'une tranchée. Un rapport d'aspect de 10 est couramment atteint, un rapport d'aspect de 20 peut être obtenu pour un procédé bien maîtrisé et dans certains cas, notamment pour des gravures submicroniques, un rapport d'aspect de 100 peut être atteint [Marty 2005].

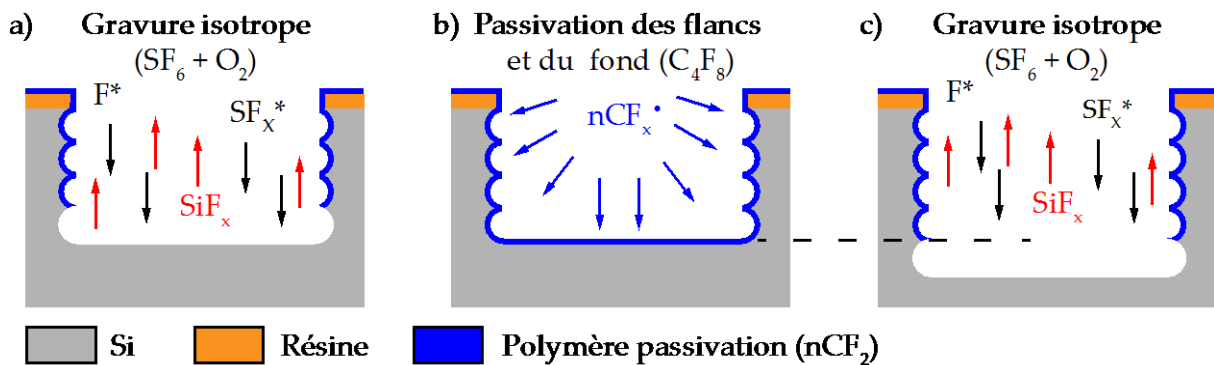


Figure 2.17 : Schéma du principe de gravure utilisé par le procédé Bosch.

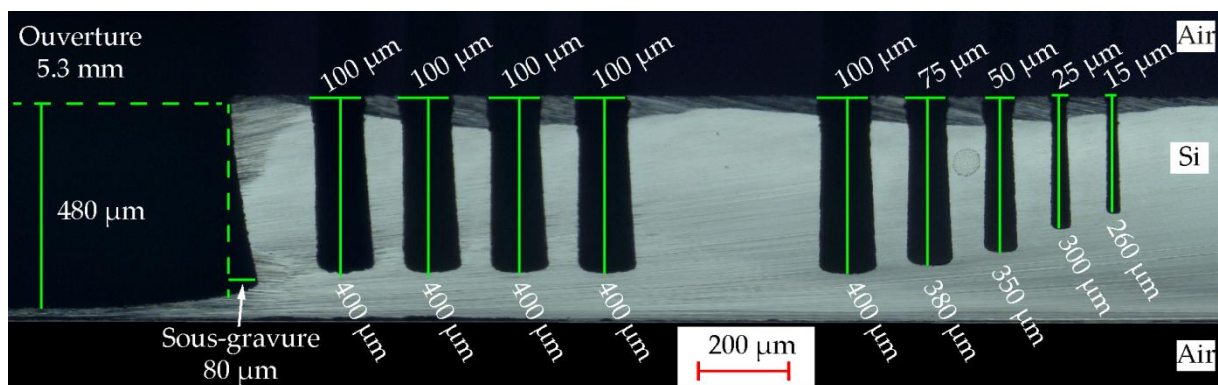


Figure 2.18 : Vue en coupe de gravures DRIE de tranchées de largeur différentes, réalisées pendant la thèse.

Contrairement aux gravures anisotropes humides par KOH ou TMAH, cette gravure a pour avantage d'utiliser un simple masque en résine pour protéger le silicium ne devant pas être gravé.

L'inconvénient de la DRIE est que la vitesse de gravure varie fortement avec la taille, la forme, et la densité des ouvertures. D'une manière générale, la DRIE grave plus rapidement les grandes ouvertures que les petites ouvertures (cf. figure 2.18). Ce phénomène connu sous le sigle ARDE (Aspect Ratio Dependent Etching) nécessite donc dans certains cas de modifier le procédé de fabrication pour prendre en compte ces différences de vitesse de gravure. Nous verrons dans le chapitre 5 (p139) que ce problème a été résolu en utilisant des motifs de remplissage temporaires.



Figure 2.19 : Exemple de filtre Fabry Pérot réalisé par micro-usinage de volume, à l'aide d'une gravure DRIE. [Palmer 2006]

Un exemple de filtre Fabry Pérot fabriqué par Kuhn, Mott, Palmer et al. utilisant la DRIE est présenté dans la figure 2.19 [Kuhn 2000 ; Mott 2003 ; Palmer 2006]. Le Fabry Pérot est constitué par un assemblage de deux wafers, il utilise un actionnement électrostatique, les deux miroirs sont sous forme de membranes et font tous deux 1 cm de diamètre.

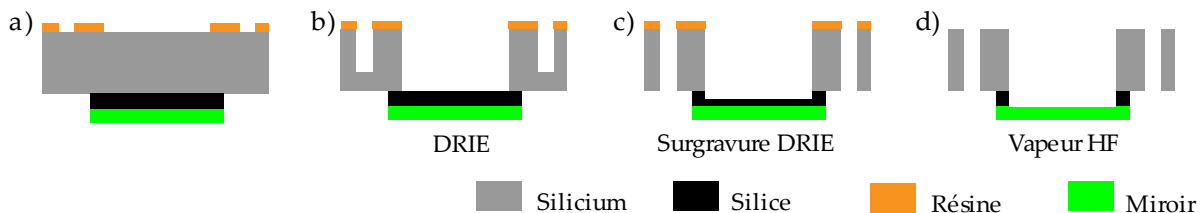


Figure 2.20 : Procédé de fabrication utilisé dans [Palmer 2006] pour fabriquer la membrane par DRIE.

Les grandes lignes du procédé de fabrication utilisée par Palmer, Mott, et al. sont schématisées sur la figure 2.20 et détaillées ci-dessous :

- Figure 2.20a : dépôt (au niveau des miroirs) d'une couche d'arrêt en silice, puis d'une couche de nitrure.
- Figure 2.20b : gravure DRIE.
- Figure 2.20c : à cause des différences de vitesse de gravure entre les tranchées et l'ouverture sous les miroirs, il faut continuer la gravure DRIE jusqu'à libérer les ressorts tout en sur-gravant au niveau de la silice.
- Figure 2.20d : A la fin de la gravure DRIE, la silice est retirée en utilisant des vapeurs d'acide fluorhydrique.
- La dernière étape (non représentée sur la figure 2.20) consiste à déposer le miroir multicouche sur la membrane en nitrure.

Les auteurs ont été contraints d'utiliser ce procédé de fabrication, car un miroir diélectrique nécessite de contrôler l'épaisseur de chaque couche au nanomètre près. Or la couche d'arrêt en silice est en partie gravée par la DRIE, il faut donc la retirer pour ne laisser que la couche en nitrure d'épaisseur contrôlée. Pour graver la silice, les auteurs ont préféré utiliser une gravure par vapeurs d'acide fluorhydrique, car, comparée aux gravures RIE, cette méthode n'endommage pas la couche en nitrure. Cependant, le miroir diélectrique ne résistant pas à cette gravure, il n'a pu être déposé qu'après le retrait de la silice.

Dans notre cas, le plus gros inconvénient de cette méthode de fabrication aurait été la nécessité de garantir la résistance et la propreté de toutes les membranes. C'est pourquoi, nous avons utilisé un procédé de fabrication légèrement différent (cf. partie 3.3 p91) : le miroir sera déposé en premier, et le retrait du silicium sous les miroirs sera la dernière étape du procédé de fabrication de la partie mobile (avant l'assemblage des wafers).

Enfin, toujours dans l'article [Palmer 2006], les auteurs parlent de la planéité de leurs miroirs. Pour obtenir les performances optiques désirées, les auteurs ont besoin d'une planéité des miroirs inférieure à 12 nm. Or sur la membrane en nitrure seule (avant dépôt du miroir multicouche), les auteurs ont mesuré sur plusieurs échantillons une planéité RMS allant de 38 à 248 nm, soit plus de trois fois plus élevée que la valeur désirée. Ils ont donc sélectionné les échantillons possédant la meilleure planéité pour y déposer les miroirs diélectriques, et n'ont finalement obtenu qu'une planéité dégradée de 60-70 nm après dépôt. Les auteurs ont conclu que les déformations du miroir dépendent fortement des contraintes résiduelles des couches et de la planéité initiale du wafer. Ces deux points seront vérifiés au cours de cette thèse dans la partie 4.5.3 (p132).

En conclusion, la DRIE est une méthode de gravure peu contraignante, car un simple masque en résine peut être utilisé. La forte anisotropie de cette gravure (avec des flancs quasi-verticaux) permet de fabriquer des structures très compactes. Il faut cependant faire attention à la dépendance entre la vitesse de gravure et le rapport d'aspect des ouvertures. Ce problème et la solution proposée seront présentés en détail dans la partie 5.2 (p142) de cette thèse.

Enfin, la planéité de miroirs sous forme de membrane n'étant pas garantie (cf. [Palmer 2006]), je devrai sélectionner les wafers les plus plats, contrôler les contraintes résiduelles des couches, et minimiser la surface des couches qui seront à déposer sur la structure mobile. Tous ces points ont été pris en compte lors de la conception du procédé de fabrication dans la partie 3.3 (p91).

2.3.3 Caractéristiques et performances des Fabry Péroต์ micro-usinés

Dans les deux pages qui suivent, j'ai listé les propriétés optiques et mécaniques obtenues par les différents auteurs qui ont été cités dans cette bibliographie. Bien que la plupart des travaux publiés concernent des filtres pour l'infrarouge, j'ai privilégié les références à des travaux sur les cavités Fabry Péroต์ fonctionnant dans le domaine visible. L'examen du tableau montre que la taille des miroirs qui ont été réalisés est typiquement ≤ 2 mm, et que l'actionnement le plus courant est de type électrostatique avec une course voisine ou inférieure à $1 \mu\text{m}$.

Référence	Longueur d'onde (μm)	Finesse	FWHM (nm)	Réflectance miroir	Transmittance	Diamètre pupille (mm)
[Giovannelli 2012]	0,55-0,9	19.2	0,037- 0,0006	90 %	59,8	25,4
[Saari 2009]	0,45-0,75 0,5 -0,9	?	7-10 6-9	?	>20 %	2,8-7
[Yamanoi 2008]	1,47-1,59	121-117	1,3-1,2	98 %	66,7-69,3 %	1 x 1
[Stupar 2009]	11,8-7,9	?	120	?	70-20 %	0,2 x 0,2
[Keating 2008]	1,6 -2,5 (désiré)	?	110-116 / 92-99	~90 %	>40-60 %	0,09 x 0,09
[Winchester 2001]	0,55-0,9	?	?	?	90-70 % (mesuré réflectance)	?
[Blomberg 2010 ; Rissanen 2012]	0,4-0,5 0,6-0,8	?	4-9	?	30-90 % 60-80 %	1-2
[Gupta 2012]	0,4-0,8	8.8	20	70 %	25-10 %	6
[Neumann 2008]	3-4,1 3,9-5,0	40-60	100 \pm 20 80 \pm 20	95-96 %	75-60 %	2 x 2
[Correia 1999]	0,4-0,8	30	12	>90 %	10 % (parallélisme non ajusté)	2 x 2
[Kuhn 2000 ; Mott 2003 ; Palmer 2006]	compris entre 0,7-5	15-7	?	>90 %	~90 %	10
[Jerman 1991]	1,3-1,55	40	0,9	95-97,5 %	>70-44 %	1,4 x 1,4
[Bondavalli 2001]	1,68-1,77	?	14-16	96-98 %	~50 %	0,04
[Malak 2011b]	1,55	?	0.177	>97 %	0.6 %	?

Référence	Gap d'air (μm)	Diamètre pupille (mm)	Type miroir	Tension actionnement (V)	usage
[Giovannelli 2012]	300-20 000	25,4	diélectrique sur verre	?	assemblage
[Saari 2009]	0,3-50 ?	2,8 - 7	métal sur quartz (4 nm Ti/ 50 nm Ag/50 nm SiO ₂)	?	assemblage
[Yamanoi 2008]	6,4-7	1 x 1	diélectrique sur verre	0-70	assemblage
[Stupar 2009]	?	0,2 x 0,2	diélectrique sur Si	?	surface + assemblage
[Keating 2008]	1,4-0,93	0,09 x 0,09	Ge/SiO/Ge + couches SiN _x	7,5-20	surface
[Winchester 2001]	0,989-0,744	?	métal sur Si et membrane Si ₃ N ₄ (Au)	1,6	surface
[Blomberg 2010 ; Rissanen 2012]	1,33	1-2	diélectrique (TiO ₂ , Al ₂ O ₃)	0-21	surface
[Gupta 2012]	2,11-1,715	6	métal sur quartz (30 nm Ag + 100 nm ITO)	0-60	volume (HF)
[Neumann 2008]	1,369-2,225 1,845-2,693	2 x 2	diélectrique sur Si (SiO ₂ , poly Si)	0-27 0-60	volume (KOH)
[Correia 1999]	~0,5	2 x 2	métal sur membrane Si ₃ N ₄ (40 nm Ag, 300 nm Si ₃ N ₄)	0-21	volume (KOH)
[Kuhn 2000 ; Mott 2003 ; Palmer 2006]	18-17	10	diélectrique	0-40	volume (DRIE)
[Jerman 1991]	24	1,4 x 1,4	diélectrique sur Si	120-70	volume (KOH)
[Bondavalli 2001]	0,9-0,8	0,04	InP/air	0-11	surface
[Malak 2011b]	265.8	?	Si/air	-	volume

2.4 Conclusion

Ce bref état de l'art des filtres Fabry Pérot intégrés présenté ci-dessus montre que deux voies d'intégration sont possibles : le micro-usinage de surface, et le micro-usinage de volume.

Le micro-usinage de surface est principalement adapté pour la fabrication de filtre Fabry Pérot de faible diamètre, car dans la littérature, le filtre le plus large qui ait été obtenu ne mesure que 2 mm de diamètre. Ce type de procédé de fabrication a les inconvénients suivants : les couches déposées sont fines, l'absence de structures rigides nécessite un contrôle précis des gradients de contrainte résiduelle, et enfin, le recours à une sous-gravure d'une couche sacrificielle peut nécessiter (pour les miroirs de plus grand diamètre) la présence de trous, et comporte en outre un risque de stiction très élevé.

A l'inverse, le micro-usinage de volume peut être utilisé pour réaliser tous les Fabry Pérot de grande taille (jusqu'à un centimètre de diamètre). Cependant, comparé au micro-usinage de surface, le micro-usinage de volume nécessite d'assembler plusieurs wafers ; mais en contrepartie, il offre la possibilité de fabriquer un cadre rigide.

Trois méthodes de gravure utilisées pour fabriquer des filtres Fabry Pérot ont été passées en revue : la gravure isotrope humide (acide fluorhydrique pour le verre), la gravure anisotrope humide (KOH, TMAH), et la gravure anisotrope sèche (DRIE).

La matrice de filtres Fabry Pérot à fabriquer requiert des miroirs de grand diamètre (>5 mm), de très bonne planéité, et avec un taux de remplissage élevé. C'est pourquoi la technologie de fabrication qui a été retenue est basée sur un micro-usinage de volume par DRIE.

Chapitre 3

Conception de la matrice de Fabry Péro ajustables intégrés 3D

Le chapitre précédent a permis de choisir la méthode de micro-usinage de volume par DRIE pour la réalisation de la matrice de filtres Fabry Péro. La configuration générale du MOEMS qui est proposée est schématisée dans la figure 3.1.

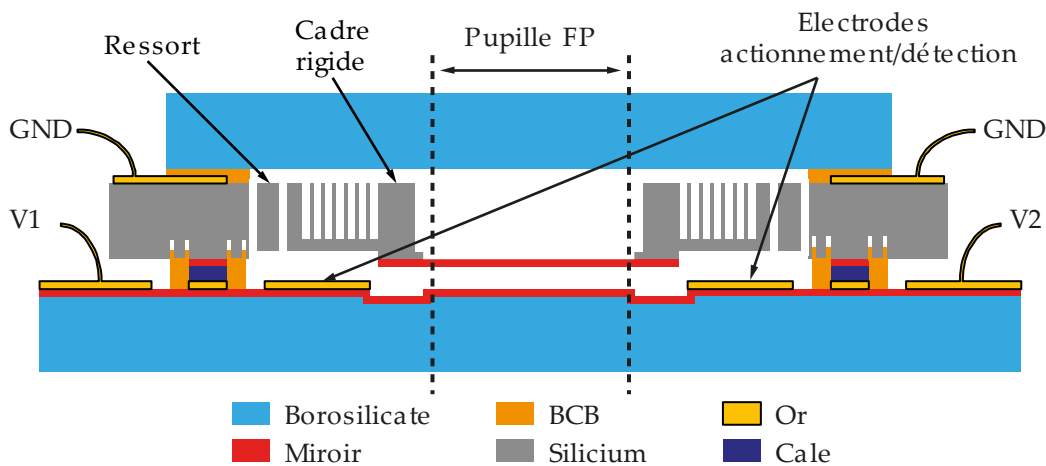


Figure 3.1 : Architecture proposée des Filtres Fabry Péro en technologie MOEMS intégré 3D.

La réalisation de la matrice de filtres Fabry Péro repose sur un assemblage de trois wafers :

- Le miroir mobile sera sous forme d'une membrane intégrée sur un wafer en silicium micro-usiné par DRIE.
- Le miroir fixe sera déposé sur un wafer transparent en borosilicate.
- Le troisième wafer sera aussi en borosilicate, il servira uniquement à encapsuler la face arrière du MOEMS.

Pour la partie mobile, nous avons choisi d'utiliser un wafer en silicium, car la gravure DRIE du silicium est maîtrisée, et est couramment utilisée en micro-fabrication. De plus, le silicium offre des propriétés mécaniques excellentes, avec une rigidité élevée. Structuellement, le miroir mobile est constitué d'un cadre rigide relié au reste du wafer par des ressorts gravés directement dans l'épaisseur du wafer en silicium. D'un point de vue optique, le silicium est opaque aux longueurs d'ondes visibles, c'est pourquoi le miroir mobile doit être sous forme de membrane encastrée sur le cadre rigide en silicium.

Dans un premier temps, pour simplifier le processus de fabrication, nous avons choisi de déposer le miroir fixe sur un wafer en borosilicate transparent dans le visible. Ce type de wafer est utilisé car son coefficient de dilatation est proche du silicium. Cette propriété sera utile lors de l'assemblage des wafers, car la soudure nécessitera de chauffer à plusieurs centaines de degrés.

L'actionnement et le contrôle du gap sont réalisés par un actionnement électrostatique et par une détection capacitive. L'actionnement et la détection utilisent les mêmes électrodes, il faudra donc superposer une tension AC de faible amplitude (pour la détection capacitive), à une tension DC d'une centaine de volts (pour l'actionnement).

Pour l'ajustement du gap d'air et du parallélisme des miroirs, il faut appliquer un total de 13 tensions différentes sur l'ensemble de la matrice de filtres.

La structure mobile sera mise à la masse. Pour une résistance électrique faible, nous avons sélectionné un wafer en silicium fortement dopé. Ceci permet de déposer les plots de contacts à la périphérie de la structure, et nous évite de déposer des couches métalliques sur les ressorts et le cadre de la structure mobile. De cette manière, seules les contraintes résiduelles des miroirs auront un impact sur les déformations de la structure mobile.

Les 12 autres potentiels seront appliqués sur des électrodes déposées et structurées sur le wafer en borosilicate.

Enfin, pour avoir tous les plots de connexion du même côté, le wafer sera découpé (avec une scie diamantée) de manière à former une géométrie pyramidale. Cependant, lors de la découpe, l'échantillon et la scie étant refroidis par de l'eau, il faudra prévoir une encapsulation étanche des Filtres Fabry Pérot. Ceci est obtenu à l'aide d'un troisième wafer en borosilicate, assemblé avec un joint en polymère photo-définissable en benzocyclobutène (BCB). Le choix d'un joint en polymère n'assure pas une herméticité élevée, mais permet un assemblage avec une bonne adhérence à basse température, et avec une flexibilité favorisant la relaxation des contraintes mécaniques. Par ailleurs, l'encapsulation permet également une protection des filtres contre les poussières qui pourraient s'introduire entre les deux miroirs.

Dans les parties qui suivent, je décrirai la conception des miroirs diélectriques, puis je présenterai le dimensionnement de la structure mobile en silicium, et enfin j'exposerai le procédé de fabrication.

3.1 Conception des miroirs diélectriques

Cette partie présente les travaux qui ont permis de définir les multicouches diélectriques constituant les miroirs des filtres Fabry Péro et d'estimer les performances attendues des filtres.

Dans un premier temps, je rappellerai les formules classiques de l'interféromètre Fabry Péro symétrique, puis je présenterai une formule plus générale de la transmittance d'un interféromètre Fabry Péro, laquelle prend en compte l'asymétrie des miroirs et le déphasage introduit à la réflexion. Enfin, je présenterai les résultats des simulations optiques (avec le logiciel TFCALC) de différents empilement de couches, pour aboutir à différentes conceptions des multicouches utilisées pour fabriquer les miroirs fixes et mobiles.

3.1.1 Transmittance d'un filtre Fabry Péro idéal

Les filtres Fabry Péro sont composés de deux miroirs semi-réfléchissants. La figure 3.2 représente un schéma en coupe d'une cavité Fabry Péro.

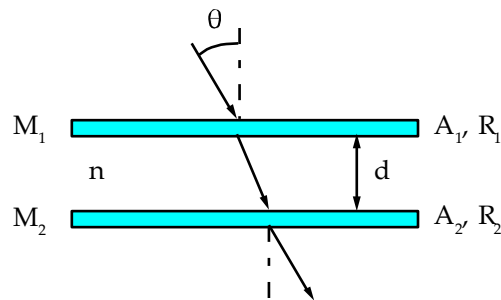


Figure 3.2 : Schéma de principe d'une cavité Fabry Péro avec le trajet d'un rayon.

Dans la suite du manuscrit, nous appellerons Fabry Péro simplifié le cas où les miroirs ont des coefficients de réflexion en intensité (réflectance) identiques ($R_1 = R_2 = R$), et des déphasages à la réflexion nuls. Le coefficient de transmission en intensité (transmittance) est alors donné par la formule classique (3.1) [Born 1999].

$$T = \left(1 - \frac{A}{1 - R}\right)^2 \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1 - R)^2} \sin^2(knd \cos(\theta))} \quad (3.1)$$

A : absorbance des miroirs,

R : réflectance de la surface interne des miroirs,

$k = 2\pi/\lambda$: le nombre d'onde avec λ la longueur d'onde incidente,

n : l'indice du milieu entre les deux miroirs,

d : la distance entre les deux miroirs,

θ : l'angle incident.

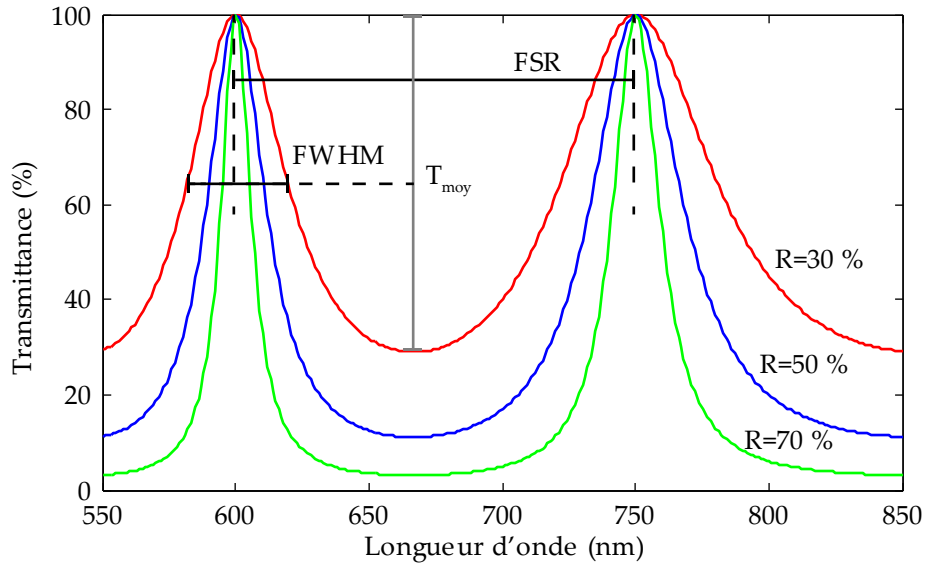


Figure 3.3 : Tracé de la formule (3.1) pour un gap d'air $d = 1500$ nm et des miroirs de réflectance R variant entre 30 et 70 %.

Un exemple de transmittance en fonction de la longueur d'onde et en fonction de différentes réflectances des miroirs est visible sur la figure 3.3. Cette figure permet de remarquer que l'un des avantages des filtres Fabry Péro est de fournir des pics de 100 % de transmittance, qui sont très fins lorsque les miroirs utilisés ont une réflectance élevée. De manière générale, l'efficacité d'un Fabry Péro peut être quantifiée par :

- ses transmittances maximale (T_{\max}) et minimale (T_{\min}) ;
- la largeur à mi-hauteur de ses pics de transmission (FWHM) ;
- l'intervalle spectral libre (ISL) qui donne la distance minimale entre deux pics de transmission contigus ;
- la finesse (f) qui caractérise le pouvoir de résolution de l'interféromètre.

Les transmittances minimale et maximale sont données par les formules (3.2) et (3.3). Ces deux formules permettent de remarquer que la transmittance minimale dépend de l'absorbance et de la réflectance des miroirs : plus la réflectance est faible, et plus la transmittance minimale sera élevée. Quant à la transmittance maximale, elle ne dépend que de l'absorbance des miroirs, et devrait en principe être pratiquement égale à 100 % pour des miroirs diélectriques.

$$T_{\min} = \left(1 - \frac{A}{1-R}\right)^2 \frac{(1-R)^2}{(1+R)^2} \quad (3.2)$$

$$T_{\max} = \left(1 - \frac{A}{1-R}\right)^2 \quad (3.3)$$

Pour un Fabry Pérot id el, la position des pics de transmittance est donnée par la formule (3.4), elle dépend de l'ordre d'interférence m (un entier ≥ 1), du gap d'air d , de l'angle d'incidence θ , et de l'indice du milieu n entre les miroirs.

$$\lambda_m = \frac{2nd \cos(\theta)}{m} \quad (3.4)$$

L'intervalle spectral libre (ISL) est donn e par la formule (3.5), il permet de connaître l'écart entre deux pics de transmittance. L'approximation de cette formule s'obtient en posant $\lambda_m \ll 2nd$.

$$ISL = \frac{\lambda_{m+1} \lambda_m}{2nd} \approx \frac{\lambda_m^2}{2nd} \approx \frac{\lambda_0^2}{2nd} \quad (3.5)$$

La largeur à mi-hauteur (FWHM) est donnée par la formule (3.6), elle se calcule à partir de la formule (3.1) en recherchant les longueurs d'onde pour lesquelles la transmittance vaut

$$T_{moy} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}.$$

$$FWHM = \frac{2\lambda_0}{m\pi} \arcsin \left(\sqrt{\frac{(1-R)^2}{4R} \left(\frac{T_{max} - T_{moy}}{T_{moy}} \right)} \right) \approx \frac{\lambda_0(1-R)}{m\pi\sqrt{R}} \quad (3.6)$$

L'approximation du dernier membre de droite de l'équation (3.6) correspond au cas où $T_{max} = 1$, $T_{moy} = 50\%$, et $\frac{(1-R)^2}{4R}$ est proche de 0.

Enfin, la finesse d'un filtre Fabry Pérot détermine sa qualité : plus la finesse est élevée, et plus les pics de transmittance seront discernables. Dans le cas id el, la finesse dépend uniquement de la réflectance des miroirs, et se calcule à partir du rapport FSR / FWHM. Une formule approchée (3.7) peut être obtenue en utilisant les formules approchées de l'ISL (3.5) et du FWHM (3.6).

$$f = \frac{FSR}{FWHM} \approx \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad (3.7)$$

Cependant, la finesse d'un Fabry Pérot dépendra aussi des défauts de fabrication :

- parallélisme des miroirs ;
- planéité des miroirs ;
- montage optique ;
- rugosité des miroirs.

Ces défauts auront pour conséquence d'élargir les pics de transmittance et de baisser la transmittance du filtre. Dans sa thèse, Jean Minet [Minet 2011a] a étudié les effets de ces défauts sur la réponse spectrale des filtres Fabry Péroต์ développés. Il a abouti à un cahier des charges qui sera présenté dans la partie 3.1.3.1 (p55).

3.1.2 Transmittance d'un filtre Fabry Péroต์ dissymétrique

La formule simplifiée de transmittance d'un filtre Fabry Péroต์ idéal n'est pas suffisante pour la conception des filtres Fabry Péroต์ intégrés étudiés dans cette thèse, cela pour deux raisons :

- Les deux miroirs peuvent avoir une réflectance différente.
- Pour des miroirs diélectriques, le déphasage à la réflexion de chacun des miroirs varie avec la longueur d'onde. Ces variations peuvent être importantes, et doivent donc être prises en compte.

J'ai donc refait le calcul de la transmittance pour le cas d'un filtre Fabry Péroต์ dissymétrique utilisant des miroirs diélectriques (voir détails dans l'annexe A p191). La formule résultante est la suivante :

$$T = (1 - R_{BK7}) \left[1 - \frac{(\sqrt{R_1} - \sqrt{R_2})^2}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2} \right] \frac{1}{1 + \frac{4\sqrt{R_1 R_2}}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2} \sin^2 \left(kdn_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin(\theta) \right)^2} - \left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right)} \right)} \quad (3.8)$$

R_1, R_2 : réflectance respective des deux miroirs

φ_1, φ_2 : déphasages à la réflexion des deux miroirs

$k = 2\pi/\lambda$: le nombre d'onde avec λ la longueur d'onde incidente

d : distance physique entre les deux miroirs

n_1, n_2 : indice respectif du milieu incident et du milieu entre les deux miroirs

θ : angle incident

R_{BK7} : réflectance de l'interface borosilicate / air

Il est à noter qu'une formule similaire a pu être trouvée dans la référence [Mielke 1997] en posant $n_1 = n_2$.

Sous cette forme, la formule (3.8) se rapproche beaucoup de la formule du Fabry Péroต์ idéal, car il suffit de remplacer R par un terme de réflectance effective $R_{eff} = \sqrt{R_1 R_2}$ et d'ajouter un terme supplémentaire de phase moyenne $\varphi_{moy} = (\varphi_1 + \varphi_2)/2$. Cependant, malgré cette ressemblance, la formule réelle (3.8) nous donne des résultats très différents de la formule simplifiée. Ces différences sont détaillées ci-après.

3.1.2.1 Extrema de transmission

La première différence entre la formule simplifiée et le formule réelle se situe au niveau des valeurs maximale (T'_{max}) et minimale (T'_{min}) de la transmittance des filtres :

Pour un Fabry Péroto idéal, la valeur maximale de la transmittance T_{\max} (3.3) est uniquement limitée par l'absorbance des miroirs. Or, dans le cas d'un Fabry Péroto réel, la valeur maximale T'_{\max} , donnée par la formule (3.9), dépend non seulement de l'absorbance des miroirs (pas prise en compte ici), mais aussi de l'écart en réflectance des deux miroirs.

Dans le cas des miroirs diélectriques considérés par cette thèse, l'absorbance des miroirs peut être négligée; Cependant, la valeur T'_{\max} de la réflectance de l'interface borosilicate \rightarrow air ($R_{BK7} \sim 4\%$) a été prise en compte, car le miroir fixe sera déposé sur un wafer en borosilicate.

$$T'_{\max} = (1 - R_{BK7}) \left(1 - \frac{(\sqrt{R_1} - \sqrt{R_2})^2}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2} \right) \quad (3.9)$$

Quant à la valeur de T'_{\min} , elle est donnée par la formule (3.10). Puisqu'elle dépend de la valeur de T'_{\max} , elle est aussi différente de la valeur T_{\min} calculée par la formule du Fabry idéal.

$$T'_{\min} = \frac{(1 - R_{BK7}) \left[(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2 - (\sqrt{R_1} - \sqrt{R_2})^2 \right]}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2 + 4\sqrt{R_1 R_2}} \quad (3.10)$$

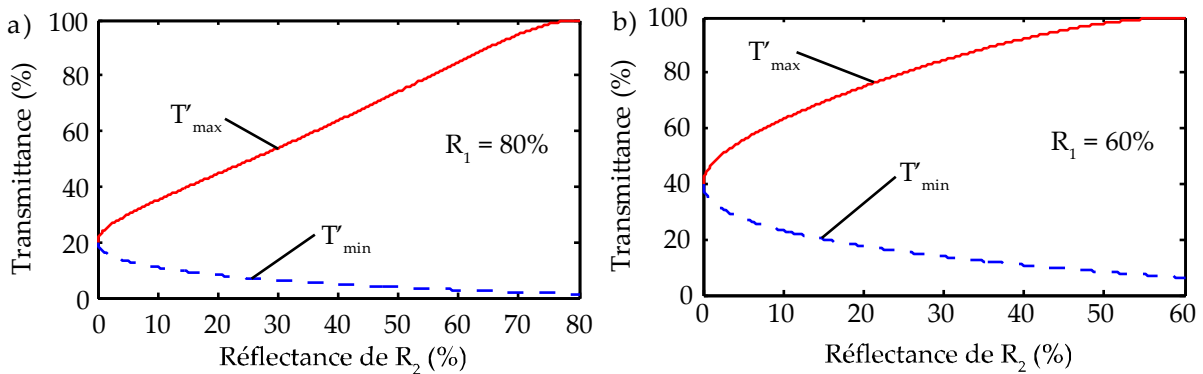


Figure 3.4 : Transmittance maximum T'_{\max} (3.9) et minimum T'_{\min} (3.10) en fonction de la réflectance du 2^{ème} miroir pour 2 valeurs de réflectance du 1^{er} miroir.

Les valeurs de T'_{\max} et T'_{\min} sont représentées sur la figure 3.4 en fonction des coefficients de réflexion R_1 et R_2 :

Il est intéressant de remarquer (figure 3.4a) que lorsque l'un des deux miroirs a une réflectance élevée ($R_1 = 80\%$), le moindre écart de la réflectance R_2 du deuxième miroir fait rapidement baisser la transmittance maximale de la cavité, alors que la transmittance minimale reste assez stable et inférieure à 20 %, même lorsque $R_2 \rightarrow 0\%$. A l'inverse, pour $R_1 = 60\%$ (figure 3.4b), la transmittance maximale de la cavité diminue plus lentement, et la transmittance minimale augmente plus rapidement.

Donc, afin d'obtenir une transmittance suffisamment élevée pour servir à de l'imagerie, il faudra essayer de minimiser l'écart de la réflectance des deux miroirs.

3.1.2.2 Effet du déphasage

Enfin la dernière différence entre la formule simplifiée du Fabry Péro et la formule (3.8) plus complète établie précédemment, se situe au niveau du déphasage à la réflexion, qui se rajoute au déphasage introduit par le gap d'air entre les miroirs. Le premier effet (le plus évident) du déphasage à la réflexion est de diminuer la valeur du gap d'air d , pour lequel se produit un maxima de transmittance. La valeur du gap d'air d est donnée par la formule (3.11) pour le cas où l'indice du milieu $n_1 = n_2$.

$$d = \frac{\lambda_0(m' \pi + \phi)}{2\pi \cos(\theta)} \quad (3.11)$$

Il est intéressant de noter que lorsque la valeur du gap d'air est élevée, la valeur de m' est élevée, et on retrouve donc la formule du Fabry Péro idéal (3.4). Ceci explique pourquoi le déphasage est en général négligé dans la formule classique de transmittance d'un filtre Fabry Péro, car les gaps d'air sont souvent de l'ordre du millimètre, et l'effet du déphasage devient négligeable. Dans notre cas, la valeur de m' sera proche de l'unité, il faudra donc utiliser la formule (3.8) pour prendre en compte l'effet du déphasage.

Il faut cependant faire attention à la valeur de l'ordre d'interférence notée m' , qui est différente de l'ordre d'interférence m du Fabry Péro idéal. En effet, dans notre cas, la valeur de déphasage Φ est comprise entre $0 \leq \Phi \leq 2\pi$. La formule (3.11) permet alors de remarquer qu'à condition d'avoir un gap d'air $d \geq 0$, et d'avoir λ_0 dans la gamme de longueur d'onde souhaitée, l'ordre d'interférence m' peut valoir $m' = -2, -1, 0, 1, \dots$ et peut donc être négatif ou nul. En pratique, cela se traduira souvent par la présence d'un pic de transmittance, même pour un gap d'air nul.

D'autre part, si on considère les dépendances de la réflectance des miroirs et du décalage de phase à la réflexion avec la longueur d'onde (miroirs dispersifs), il n'y a plus de formules simples permettant de calculer la largeur à mi-hauteur (FWHM) et l'intervalle spectral libre (ISL).

En conclusion, par rapport à des filtres Fabry Péro idéaux symétriques, il faudra s'attendre à des gaps physiques plus faibles et à des performances différentes des filtres Fabry Péro réels. Ces effets seront détaillés dans la partie suivante, consacrée à la conception des miroirs.

3.1.3 Conception des multicouches des miroirs fixes et mobiles

Dans cette partie je présente en premier le cahier des charges retenu, puis je décris les étapes de la conception des miroirs multicouches à l'aide de la formule de transmittance d'un Fabry Péroth dissymétrique.

3.1.3.1 Cahier des charges

Les travaux de thèse de Jean Minet ont permis de définir un cahier des charges de la configuration et des propriétés optiques d'une matrice de filtres potentiellement réalisable avec des performances suffisantes pour son application dans une caméra multispectrale.

La première condition concerne la géométrie de la matrice de filtres qui sera composée de quatre filtres accordables. La matrice de filtres sera positionnée devant un capteur d'imagerie divisé en quatre portions égales comportant chacune une lentille permettant de projeter l'image (cf. figure 3.5).

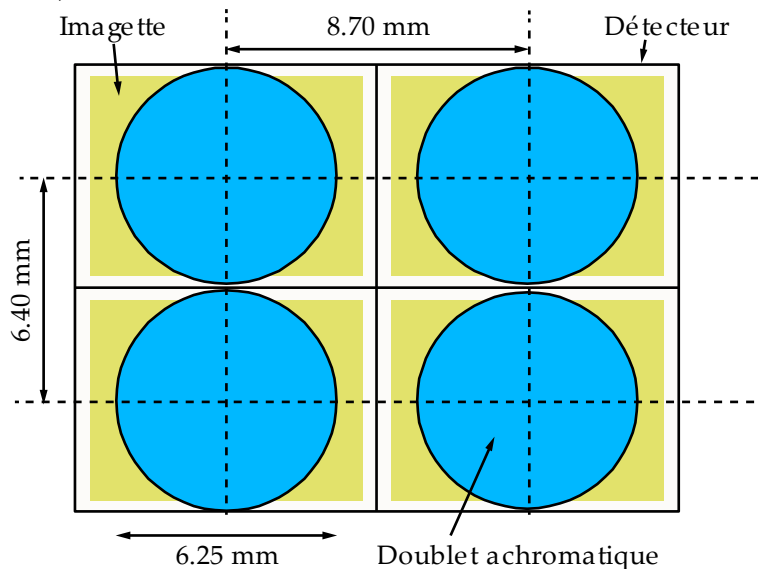


Figure 3.5 : Schéma de la matrice de quatre lentilles positionnées devant le détecteur de 2352x1728 pixels. Le détecteur est découpé en quatre imagettes de 1024x768 pixels. Chaque Fabry Péroth doit être centré sur l'une des lentilles.

Les dimensions résultantes de la matrice sont précisées dans la figure 3.5. Cette figure montre que pour des miroirs circulaires, leur diamètre doit être le plus proche possible de 6.4 mm. Concernant les propriétés optiques et géométriques des filtres Fabry Péroth, les travaux de Jean Minet ont abouti au cahier des charges suivant :

- faible absorbance pour obtenir une transmittance maximum d'au moins 80 % ;
- réflectance des miroirs approximativement constante entre 550 et 850 nm ;
- valeur maximum de la largeur à mi-hauteur (FWHM) des pics de transmission égale à 20 nm ;
- intervalle spectral libre minimum de 200 nm ;
- courbure de chacun des miroirs inférieure à 30 nm ;
- positionnement relatif du miroir mobile par rapport au miroir fixe contrôlable à 10 nm près ;
- chaque filtre doit occuper plus de 50 % de la surface de la lentille correspondante.

Pour obtenir un $ISL > 200$ nm, il faudra selon la formule simplifiée (3.5) que les ordres d'interférence m soient inférieurs ou égaux à 3. Cependant, selon la formule simplifiée (3.6), pour avoir un $FWHM = 20$ nm à une longueur d'onde $\lambda = 850$ nm et un ordre d'interférence $m = 3$, il me faudra des miroirs ayant une réflectance supérieure à 80 %.

On verra dans la partie qui suit qu'avec les matériaux utilisés, il est difficile de développer des miroirs atteignant de telles performances. Un compromis a été trouvé en recherchant une finesse de 5, c'est à dire en utilisant des miroirs ayant une réflectance effective de 55 %. On travaillera toujours à l'ordre $m = 3$, et donc le gap d'air d devra être ajusté entre 825 et 1275 nm. Ainsi, le cahier des charges à obtenir devient le suivant :

- faible absorbance pour obtenir une transmittance maximum d'au moins 80 % ;
- réflectance effective égale à 55 % entre 550 et 850 nm ;
- largeur à mi-hauteur (FWHM) des pics de transmittance inférieure à 55 nm ;
- intervalle spectral libre supérieur à 180 nm ;
- planéité des miroirs meilleure que 30 nm pic à pic ;
- positionnement du miroir mobile ajustable à 10 nm près ;
- chaque filtre doit occuper plus de 50 % de la surface de la lentille.

3.1.3.2 Généralités sur les miroirs diélectriques

Les miroirs diélectriques (aussi connus sous le nom de miroirs de Bragg) sont constitués d'un empilement de couches diélectriques alternées, ayant des indices de réfraction différents. Une réflectance élevée ne peut être obtenue qu'en sélectionnant la bonne combinaison d'épaisseurs, aboutissant à des interférences constructives au sein du multicouche.

Les miroirs diélectriques ont pour principal avantage d'être peu absorbants, au moins dans le domaine visible - proche infrarouge, mais ils ont pour inconvénient de nécessiter un contrôle avec une précision nanométrique de l'épaisseur de chaque couche. De plus, la réflectance et le déphasage à la réflexion des miroirs ne sont contrôlés que sur une faible gamme de longueurs d'onde. A l'inverse des miroirs diélectriques, les miroirs métalliques ont seulement besoin d'une fine et unique couche pour obtenir une réflectance élevée et un déphasage à la réflexion quasi-constant sur une large gamme de longueurs d'onde. Cependant, ils sont absorbants, ce qui limite fortement la transmittance. Ainsi, les valeurs maximales de transmittance mesurées sur des filtres Fabry Pérot fabriqués en utilisant des miroirs métalliques tournent souvent aux alentours de 10-20 % [Bartek 1999 ; Correia 1999 ; Saari 2009], alors que les transmittances de filtres Fabry Pérot utilisant des miroirs diélectriques peuvent atteindre 70-80 % [Rissanen 2012].

Le miroir diélectrique de type quart d'onde (que j'appellerai désormais "miroir $\lambda/4$ ") est le dimensionnement le plus utilisé, car il donne la réflectance la plus élevée possible pour une longueur d'onde centrale λ_0 et une combinaison de diélectriques donnée. Dans un miroir $\lambda/4$, chaque couche a une épaisseur $t = \lambda_0 / 4n$ où n est l'indice optique de la couche considérée, et

λ_0 est la longueur d'onde centrale. Ces miroirs sont composés d'un nombre impair de couches, avec en général le matériau d'indice le plus élevé constituant la première et dernière couche. [Orfanidis 2010]

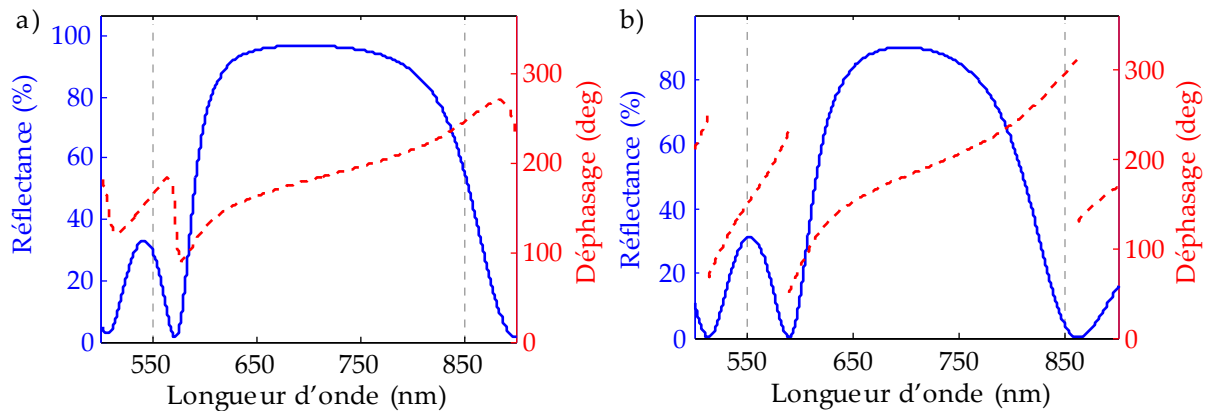


Figure 3.6 : a) Simulation sous TFCalc de la réflectance et du déphasage à la réflexion de deux miroirs $\lambda/4$, composés de 9 couches.

a) Miroir déposé sur borosilicate, composé d'un empilement de 4 couches de fluorure d'yttrium (YF_3), et 5 couches de sulfure de zinc (ZnS), ayant respectivement 116.63 nm et 74.79 nm d'épaisseur.
 b) Miroir sous forme de membrane, composé d'un empilement de couches de silice PECVD (SiO_2), et de nitrure de silicium PECVD (Si_3N_4), ayant respectivement 119.74 nm et 89.88 nm d'épaisseur.

Cependant, pour fabriquer les miroirs des filtres Fabry Péro, la configuration $\lambda/4$ n'est pas le meilleur choix. Ceci est apparent sur les figure 3.6a et b qui présentent deux simulations de miroirs $\lambda/4$ réalisées sous TFCALC avec les valeurs d'indices utilisées pour cette thèse. Ces deux miroirs composés d'un empilement de 9 couches permettent d'atteindre une réflectance maximale de 96.8 % pour le miroir déposé sur borosilicate, et de 89.9 % pour le miroir sous forme de membrane. Ces réflectances sont excellentes, mais ne restent supérieures à 80 % que dans une bande de longueurs d'onde étroite, centrée autour de 700 nm. Pour ces deux miroirs, la bande passante à 80 % est de 217 nm de large pour le miroir déposé sur borosilicate, et de 126 nm de large pour le miroir sous forme de membrane. Ainsi, les miroirs de type $\lambda/4$ ne permettent pas d'obtenir une réflectance contrôlée (approximativement constante) dans toute la gamme de longueurs d'onde exigée par le cahier des charges (550-850 nm). Il a donc fallu optimiser les propriétés optiques des miroirs à l'aide d'un logiciel de conception optique.

3.1.3.3 Conception miroirs en utilisant TFCALC

TFCALC est un logiciel de conception optique qui permet d'ajuster individuellement l'épaisseur de chaque couche afin d'obtenir les propriétés optiques désirées. Dans le cadre de cette thèse, j'ai utilisé TFCALC pour contrôler la réflectance et le déphasage à la réflexion des miroirs, tout en minimisant la sensibilité du dimensionnement aux variations d'épaisseurs et d'indices introduites lors de la fabrication. Notons que l'optimisation fournie par le logiciel est un minimum local : il est donc possible que la solution obtenue ne soit pas optimale.

a) Valeurs des indices

Le choix de la bonne combinaison de diélectriques est crucial, car la valeur maximale de réflectance atteignable dépend du contraste d'indice entre la couche d'indice faible et la couche d'indice élevé. Plus les indices sont éloignés, plus il sera simple d'obtenir la réflectance et le déphasage désirés. Nous avons utilisé deux combinaisons différentes de matériaux :

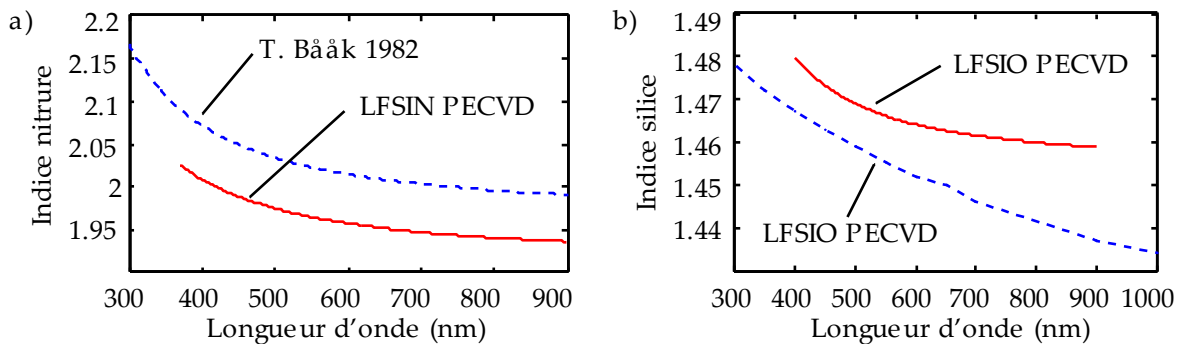


Figure 3.7 : Valeurs des indices du nitrure de silicium et de la silice utilisées pour le dimensionnement du miroir mobile. En pointillés bleus, les valeurs d'indices utilisés pour le premier dimensionnement. En rouge, les valeurs d'indices mesurées sur des dépôts PECVD et utilisés pour les derniers dimensionnements. [Bååk 1982]

Pour le miroir mobile : ce miroir est sous forme de membrane, et donc pour qu'il reste plat, il est important de pouvoir contrôler sa contrainte résiduelle. Nous avons choisi d'utiliser du nitrure de silicium ($\text{Si}_x\text{N}_y\text{H}_z$) et de la silice ($\text{Si}_x\text{O}_y\text{H}_z$) élaborés par dépôt chimique en phase vapeur assisté par un plasma (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD)). Cette méthode de dépôt a été utilisée pour plusieurs raisons : d'une part parce que ces deux matériaux sont courants en technologie silicium et disponibles à l'IEF, mais surtout parce qu'il est possible d'ajuster leurs contraintes résiduelles en modifiant la fréquence du plasma ou en faisant un recuit à haute température.

Les valeurs d'indice utilisées pour le dimensionnement du miroir mobile sont tracées dans la figure 3.7a pour le nitrure, et dans la figure 3.7b pour la silice. Pour chaque matériau, deux valeurs sont représentées : en pointillés bleu, celles utilisées par Jean Minet pour faire le premier dimensionnement des miroirs, et en rouge, celles mesurées juste avant le dépôt du dernier miroir fabriqué durant cette thèse.

Les valeurs d'indices utilisées lors du premier dimensionnement sont très éloignées des valeurs finales. Ces écarts ne proviennent pas d'une dérive des dépôts PECVD. Les premières valeurs proviennent pour le nitrure de silicium des travaux de T. Baak [Bååk 1982], et pour la silice de mesures effectuées précédemment par ellipsométrie spectroscopique. Bien que la valeur d'indice de la silice ait été mesurée sur un dépôt PECVD fait à l'IEF, il semble que l'ajustement de courbe ait été réalisé sur un intervalle trop grand, et que les résultats aient été faussés par la réflexion sur la face arrière du wafer en silicium (transparent aux infrarouges). Pour contourner ce problème, les valeurs d'indices utilisées en fin de thèse ont été ajustées sur une bande de longueurs d'onde plus faible, allant de 400 à 900 nm.

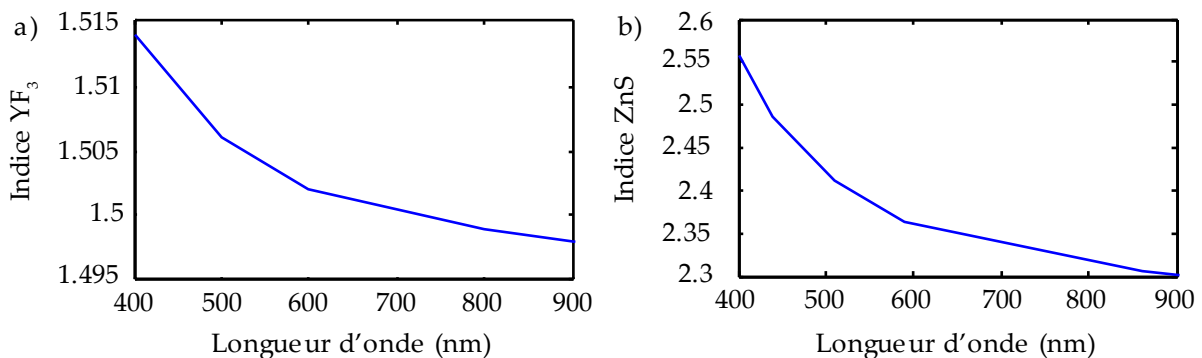


Figure 3.8 : Valeurs des indices utilisés pour le dimensionnement du miroir fixe déposé sur borosilicate. a) Indice du fluorure d'yttrium (YF₃). b) Indice du sulfure de zinc (ZnS).

Pour le miroir fixe : les couches de silice et de nitrure de silicium ont l'inconvénient d'avoir un contraste d'indice faible : il est donc difficile, à l'aide des couches déposées par PECVD, d'obtenir des miroirs ayant une réflectance supérieure à 50 %. Ainsi, pour atteindre une réflectance effective des miroirs valant $R = \sqrt{R_1 R_2} = 55\%$, nous avons utilisé une autre combinaison de couches sur le miroir fixe. Ce miroir n'a pas besoin d'avoir un multicouche en tension, des matériaux possédant un contraste d'indice plus élevé que les couches PECVD ont donc pu être sélectionnés. Ainsi, pour le miroir fixe, Jean Minet a proposé d'utiliser du fluorure d'yttrium (YF₃, $n \sim 1.5$) et du sulfure de zinc (ZnS, $n \sim 2.3$). Les indices utilisés sous TFCALC sont visibles sur la figure 3.8. Ces matériaux ne pouvant pas être déposés à l'IEF, ils seront déposés par la SAGEM REOSC.

b) Modèles utilisés pour les simulations avec le logiciel TFCALC

Les miroirs mobiles et fixes ont d'abord été optimisés séparément sous TFCALC. Les modèles de multicouches utilisés pour ces simulations sont présentés dans la figure 3.9.

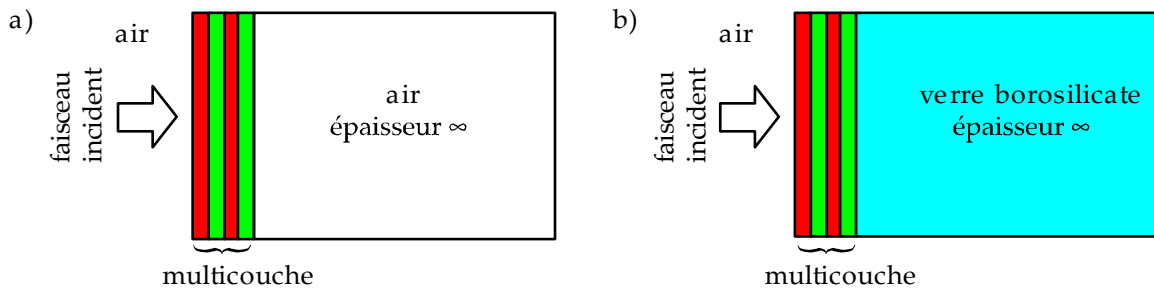


Figure 3.9 : Modèles utilisés pour l'optimisation des miroirs avec le logiciel TFCALC.

a) Modèle utilisé pour les membranes. b) Modèle utilisé pour le miroir fixe.

TFCALC a ensuite été utilisé pour simuler le filtre Fabry Péro à l'aide du modèle schématisé dans la figure 3.10a. Les résultats de cette simulation ont été comparés avec la formule analytique (3.8) en utilisant les valeurs de réflectance et de déphasage obtenus par TFCALC pour chacun des deux miroirs. La superposition des deux courbes de transmittance (cf. figure 3.10b), permet de remarquer que la formule analytique et la simulation sous TFCALC donnent le même résultat, et ne présentent en moyenne que 0.5 % d'écart. Ainsi, dans la suite, pour estimer les performances du Fabry Péro développé, j'ai utilisé la formule analytique (3.8) et un script MATLAB pour calculer la position des maxima de transmittance, la largeur à mi-hauteur (FWHM), l'intervalle spectral libre (ISL), et la finesse.

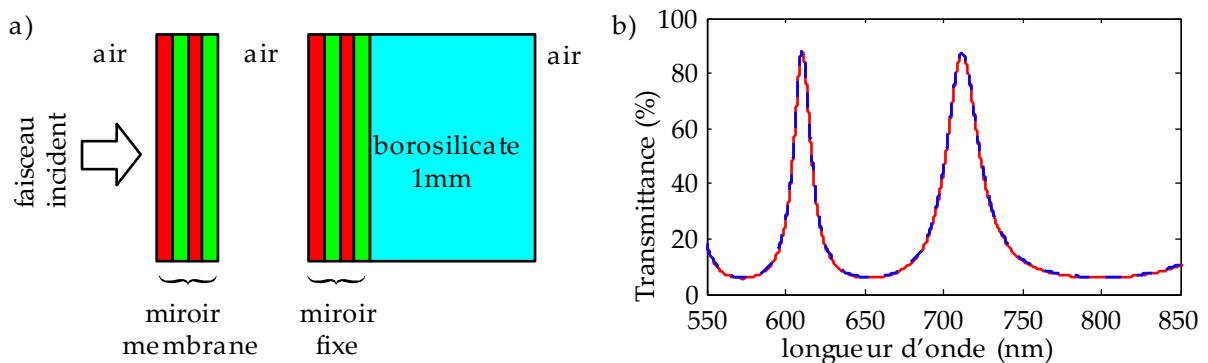


Figure 3.10 : a) Modèle utilisé pour simuler le Fabry Péro sous TFCALC.

b) Superposition de la simulation réalisée avec TFCALC (pointillés bleu) avec la valeur de transmittance calculée à partir de la formule (3.8) (courbe en rouge). Pour le premier dimensionnement des miroirs ; deux pics de transmittance sont obtenus avec un gap d'air nul, cela à cause du déphasage non contrôlé pour ce dimensionnement.

Pendant cette thèse, plusieurs dimensionnements de multicouches ont été réalisés sous TFCALC. Ci-dessous, je n'en présenterai que deux. Ces deux exemples permettent d'illustrer l'effet du déphasage à la réflexion et montrent les différents ajustements possibles permettant d'améliorer les performances des filtres Fabry Péro.

3.1.3.4 Premier dimensionnement des miroirs multicouches

Pour pouvoir rapidement démarrer des essais de fabrication de membranes et vérifier leur solidité, ce premier dimensionnement a été réalisé par Jean Minet avec les premières valeurs d'indices (cf. figure 3.7 p58 : en pointillés bleu). Les miroirs ont été dimensionnés entre 550 et 850 nm pour obtenir une réflectance moyenne de 67.8 % pour le miroir fixe (cf. figure 3.11a), et de 49 % pour le miroir mobile (cf. figure 3.11b). Ces deux miroirs donnent une réflectance effective de 57.6 %, ils permettent d'atteindre des transmittances maximale et minimale de 87.3 % et 6.2 % respectivement (cf. tableau 3.1).

T_{moyen}	T_{max}	T_{min}
$46.8 \pm 0.4 \%$	$87.3 \pm 0.6 \%$	$6.2 \pm 0.4 \%$

Tableau 3.1 : Transmittances attendues pour le premier dimensionnement des miroirs.

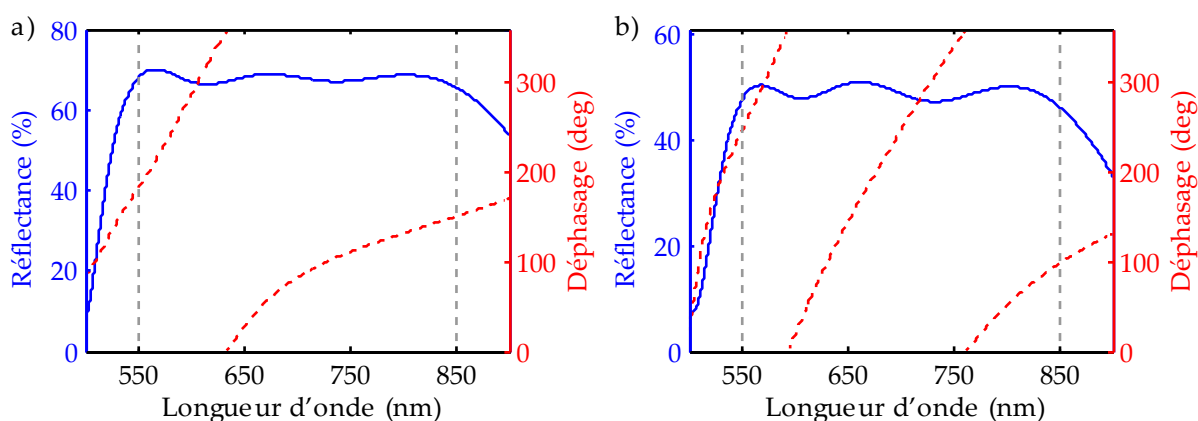


Figure 3.11 : Tracés de la réflectance (trait plein) et du déphasage à la réflexion (trait pointillé) pour le premier dimensionnement des miroirs.

a) Miroir fixe $R = 67.8 \%$.

b) Miroir mobile $R = 49 \%$.

L'épaisseur de chaque couche est listée dans le tableau 3.2 pour le miroir fixe, et dans le tableau 3.3 pour le miroir mobile. Chacun des deux multicouches est composé de 8 couches et a une épaisseur totale inférieure à 900 nm.

ZnS (H) / YF ₃ (L) : épaisseur totale 796 nm, 8 couches
Borosilicate / H 173 / L 101 / H 68 / L 111.5 / H 71 / L 114 / H 106 / L 52 / Air

Tableau 3.2 : Epaisseurs en nm des couches à déposer sur le borosilicate pour fabriquer un miroir fixe ayant une réflectance de 67.8 %.

SiO ₂ (L) / Si ₃ N ₄ (H) : épaisseur totale 896.9 nm, 8 couches
Silicium / H 67.5 / L 118 / H 83 / L 115 / H 132 / L 206 / H 51 / L 125.5 / Air

Tableau 3.3 : Epaisseurs en nm des couches déposées sur le silicium pour fabriquer le miroir mobile sous forme de membrane avec une réflectance de 49 %.

Pour ces multicouches, seule la réflectance des miroirs a été optimisée. Ainsi, le déphasage (tracé en pointillés rouges sur la figure 3.11) présente des discontinuités. La valeur moyenne

du déphasage est tracée dans la figure 3.12. Cette courbe montre qu'il y a en tout trois changements brusques du déphasage à la réflexion.

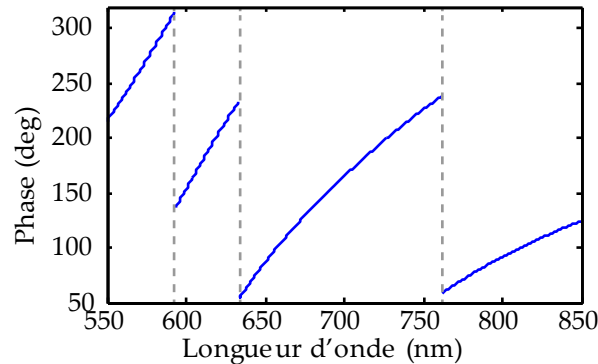


Figure 3.12 : Valeur de la phase moyenne calculée à partir des valeurs simulées par TFCALC.

La figure 3.13 représente la position des maxima de transmittance en fonction de la longueur d'onde, du gap d'air et de l'ordre d'interférence m' . Sur cette figure, il est possible de voir que pour un gap d'air nul, il y aura deux pics de transmittance, alors que pour un Fabry Péroet idéal, il n'y en aurait eu aucun.

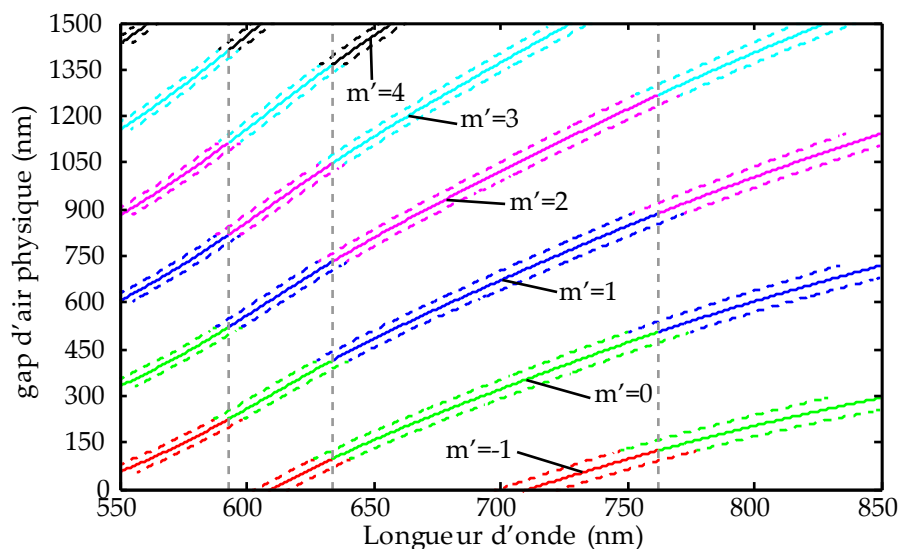


Figure 3.13 : Tracé en fonction de la longueur d'onde, des maxima de transmittance (en trait plein) et de la position de la largeur à mi-hauteur (en pointillé). Les courbes sont colorées selon l'ordre d'interférence m' . Les traits verticaux (en pointillés gris) indiquent la position des sauts du déphasage moyen.

Il est intéressant de noter que les sauts du déphasage à la réflexion ne se traduisent pas par un changement brusque de la position du maxima de transmittance (les courbes des maxima sont continues), mais par un changement de l'ordre d'interférence m' . Sur un Fabry Péroet idéal et pour un gap d'air donné, il n'y aurait eu qu'un seul ordre d'interférence m par pic de transmittance. Malgré cette différence, il est possible de superposer les maxima de transmittance d'un Fabry Péroet idéal sur les maxima de la figure 3.13, sur chaque portion de courbe où le déphasage est continu.

Pour réaliser cela, il est nécessaire de rajouter à la valeur du gap d'air physique un gap d'air correctif d_c qui prenne en compte les effets du déphasage. La valeur de cette constante d_c est calculée à partir des formules (3.4) et (3.11) donnant les maxima de transmittance pour les cas simplifié et réel, et en posant que :

$$d = \frac{\lambda m}{2n \cos(\theta)} = \frac{\lambda(m' \pi + \phi)}{2n \pi \cos(\theta)} + d_c \quad (3.12)$$

Ici, il faut faire attention aux différentes valeurs de l'ordre d'interférence, noté m (avec $m \geq 1$) pour le cas du Fabry Péroto idéal, et noté m' pour le cas du Fabry Péroto réel. Ce sont tous les deux des entiers, et pour pouvoir calculer la valeur de d_c il faut poser $m = m' + L$, avec L un entier donnant l'écart entre m et m' .

Ainsi, la formule (3.12) devient :

$$d_c = \frac{\lambda(\pi L - \phi)}{2\pi m \cos(\theta)} \quad (3.13)$$

avec $L = m - m'$

La valeur de L dépend de la valeur du déphasage, elle doit être recherchée pour que la valeur moyenne de d_c soit à peu près constante sur toute la gamme de longueurs d'onde où le déphasage est continu. Il est donc possible de définir un Φ_{moy} idéal (formule (3.14)) permettant d'obtenir une position des maxima quasi-identique à un Fabry Péroto idéal :

$$\phi_{\text{moy}} \approx \pi L - \frac{d_c 2\pi m \cos(\theta)}{\lambda} \quad (3.14)$$

Pour ce dimensionnement de multicouche, les valeurs de L et de d_c moyen sont données dans le tableau 3.4. Ainsi, chaque portion du déphasage correspond quasiment à un Fabry Péroto idéal ayant un ordre d'interférence $m = m' + L$. Par exemple, pour l'ordre d'interférence réel $m' = 1$, la première portion du déphasage (allant de $\lambda = 550$ à 593 nm), correspond à l'ordre d'interférence $m = 10$ d'un Fabry Péroto simplifié.

longueur d'onde (nm)	L	d_c (nm)
550-593	9	2437.2 \pm 7.2
593-633.6	9	2440.6 \pm 14.66
633.6-762.1	6	1783.9 \pm 6.9
762.1-850	4	1399.7 \pm 2.5

Tableau 3.4 : Valeur du gap d'air correctif d_c calculé pour chaque portion du déphasage.

Il est intéressant de noter que la valeur de d_c devient importante lorsque le déphasage varie rapidement avec la longueur d'onde (cf. figure 3.12 pour les valeurs du déphasage), car les deux premières portions ont $d_c \sim 2440$ nm, alors que la dernière portion a $d_c \sim 1400$ nm. Il devient donc envisageable d'ajuster la valeur du déphasage pour augmenter artificiellement

la valeur du gap d'air calculé par la formule d'un Fabry Péroto idéal. Cette propriété peut devenir utile lorsque le Fabry Péroto est dimensionné pour de l'infrarouge moyen ou lointain, car les gaps d'air trop importants peuvent devenir difficiles à obtenir à l'aide des techniques de micro-fabrication. Malgré la faible réflectance des miroirs, cette technique peut aussi diminuer le FWHM, mais dans ce cas, il faudra avoir recours à des filtres passe bande pour sélectionner le pic de transmittance.

Les valeurs de l'ISL et du FWHM sont calculées ci-dessous. Cependant, malgré la ressemblance des maxima entre le cas réel et idéal, la variation du déphasage et de la réflectance en fonction de la longueur d'onde ne permet plus d'utiliser les formules simplifiées pour calculer l'ISL, le FWHM, et la finesse. J'ai donc eu recours à un script MATLAB pour calculer ces valeurs à l'aide de la formule analytique (3.8) donnant la transmittance d'un Fabry Péroto réel :

La valeur du FWHM a été obtenue en mesurant la largeur du pic de transmittance à $T_{\text{moy}} = 46.8 \%$ (c'est-à-dire sans interpolation à 50 %). Les résultats sont visibles sur la figure 3.14a et montrent que la majorité des pics ont des FWHM de 10-20 nm. Ces valeurs du FWHM sont compatibles avec les deux cahiers des charges.

Pour l'intervalle spectral libre (ISL), la distance minimale a été déterminée uniquement pour les pics situés entre 550 et 850 nm, car en dehors de cette zone, la réflectance des miroirs baisse rapidement (cf. figure 3.11). Les valeurs de l'ISL ainsi mesurées sont tracées dans la figure 3.14b, et se situent entre 40 et 160 nm. Ces valeurs sont trop faibles et auraient dû être supérieures à 200 nm ou à 180 nm pour être compatibles avec les exigences du premier et du deuxième cahier des charges.

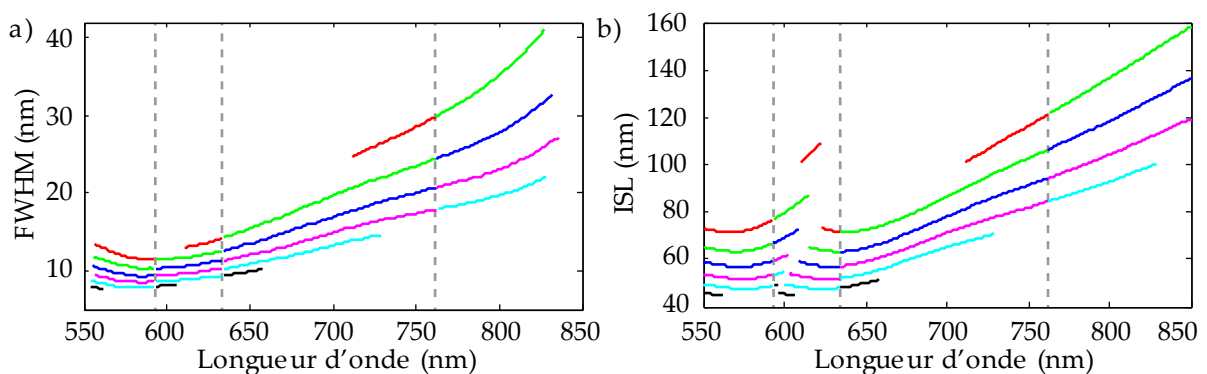


Figure 3.14 : Largeur à mi-hauteur (FWHM), et intervalle spectral libre (ISL) du premier dimensionnement des miroirs. Lorsque cela a été possible, les valeurs ont été calculées à l'aide de la formule (3.8) donnant la figure de transmittance de la cavité. Des couleurs différentes sont utilisées pour représenter les différents ordres d'interférence m' .

Il est intéressant de remarquer que lorsque le déphasage varie rapidement, les valeurs du FWHM et de l'ISL peuvent devenir quasi-constantes, voire même baisser lorsque la longueur d'onde augmente. En effet, dans un Fabry Péroto idéal, le FWHM et l'ISL augmentent de

manière linéaire avec la longueur d'onde. Ainsi, il est également envisageable de modifier la valeur du déphasage pour obtenir les FWHM et l'ISL désirés.

Enfin, la valeur de la finesse a été calculée à l'aide des valeurs de l'ISL et du FWHM (cf. figure 3.15). Elle varie beaucoup (8-3,5), mais reste proche de 4,5 sur une majeure partie de la gamme de longueurs d'onde.

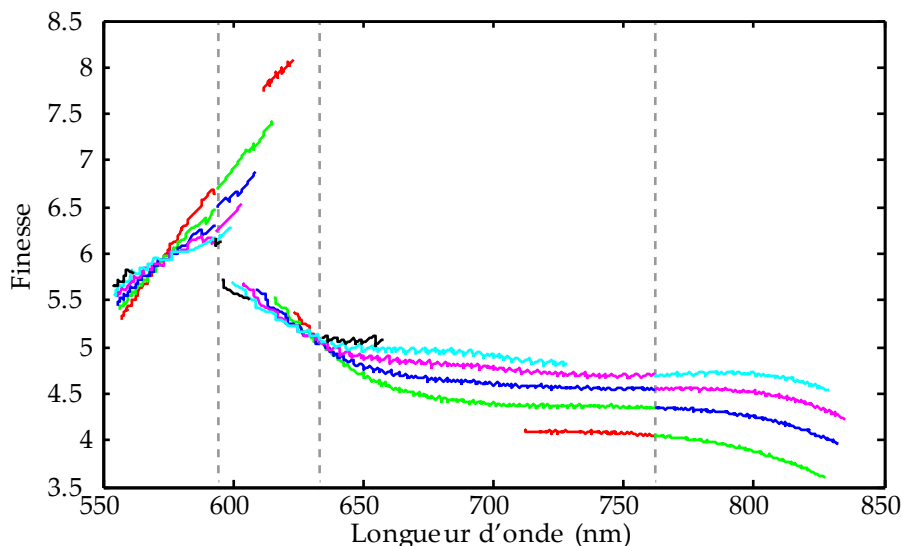


Figure 3.15 : Valeur de la finesse pour le premier dimensionnement des miroirs. Lorsque cela a été possible, les valeurs ont été calculées à partir des valeurs du FWHM et de l'ISL visibles sur la figure 3.14. Des couleurs différentes sont utilisées pour représenter les différents ordres d'interférence m' .

Donc ce premier dimensionnement de miroir n'est pas idéal, car l'intervalle spectral libre est trop faible pour l'application envisagée. Malgré cela, ce dimensionnement nous montre de nouvelles pistes qui pourraient être utilisées pour fabriquer des miroirs permettant d'obtenir des FWHM constants ou variables en fonction de la longueur d'onde.

Dans la partie suivante, afin d'essayer d'obtenir un comportement plus proche des formules d'un filtre Fabry Péroth idéal, le dimensionnement des miroirs a été modifié pour optimiser en même temps la réflectance et le déphasage à la réflexion.

3.1.3.5 Dernier dimensionnement des miroirs multicouches

Pour s'approcher le plus possible des performances d'un Fabry Péroto idéal, j'ai conçu deux nouveaux miroirs, pour lesquels la réflectance et le déphasage à la réflexion ont été optimisés. Cette fois-ci, le miroir mobile a été dimensionné à l'aide des valeurs d'indices mesurées le jour même du dépôt du multicouche (cf. figure 3.7 p58), les miroirs réalisés par PECVD seront donc plus proches des simulations.

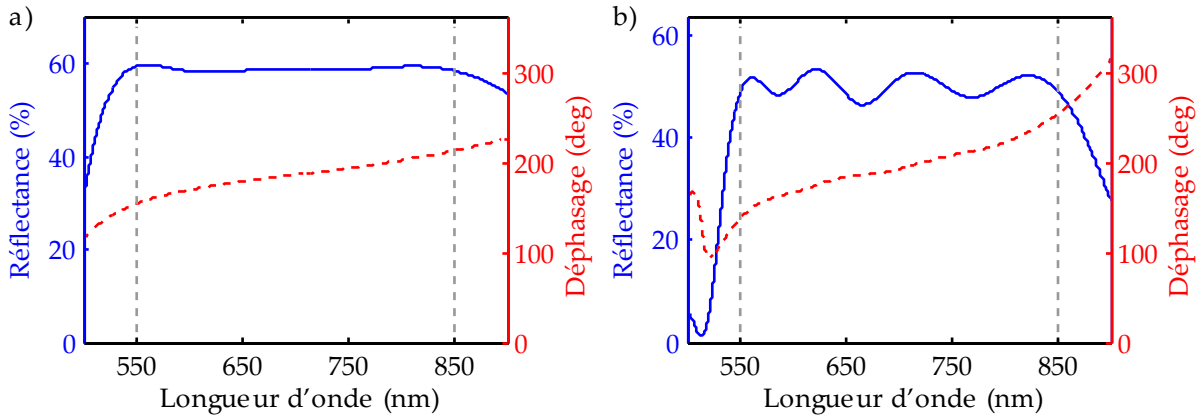


Figure 3.16 : Tracés de la réflectance (trait plein) et du déphasage à la réflexion (trait pointillé) pour le dernier dimensionnement des miroirs.

a) Miroir fixe $R = 58.9\%$.

b) Miroir mobile $R = 50.2\%$.

La réflectance et le déphasage à la réflexion sont tracés en fonction de la longueur d'onde dans la figure 3.16. Entre 550 et 850 nm, les réflectances moyennes obtenues sont de 58.9 % pour le miroir fixe et de 50.2 % pour le miroir mobile, soit une réflectance effective de 54.4 %. Cette valeur est très proche de la réflectance effective de 55 % demandée par le deuxième cahier des charges.

T_{moyen}	T_{max}	T_{min}
$51.2 \pm 0.2\%$	$94.1 \pm 0.7\%$	$8.2 \pm 0.4\%$

Tableau 3.5 : Transmittances attendues pour le dernier dimensionnement des miroirs.

ZnS (H) / YF ₃ (L) : épaisseur totale : 894 nm, 13 couches
Borosilicate / H 5 / L 84 / H 11 / L 232 / H 12 / L 25 / H 94 / L 34 / H 14 / L 136 / H 67 / L 109 / H 70 / Air

Tableau 3.6 : Epaisseurs en nm des couches à déposer sur le borosilicate pour fabriquer un miroir fixe ayant une réflectance de 58.9 %.

SiO ₂ (L) / Si ₃ N ₄ (H) : épaisseur totale : 1393.5 nm, 12 couches
Silicium / L 108 / H 117 / L 19 / H 181 / L 205 / H 53 / L 228 / H 90 / L 116 / H 84 / L 112 / H 79 / Air

Tableau 3.7 : Epaisseurs en nm des couches déposées sur le silicium pour fabriquer le miroir mobile sous forme de membrane avec une réflectance de 50.2 %.

Comparé au premier dimensionnement, les réflectances du miroir fixe et mobile sont plus proches, cela se traduit par une transmittance maximale de 94.1 % (cf. tableau 3.5), soit 7 % de plus que pour le premier dimensionnement. Cependant, la transmittance minimale est

alors de 8.2 %. Cette valeur est légèrement (2-3 %) plus faible que pour le premier dimensionnement. Les empilements de couches obtenus sont listés dans le tableau 3.6 pour le miroir fixe, et dans le tableau 3.7 pour le miroir mobile. Les valeurs d'indices utilisés pour ce dimensionnement ont un contraste plus faible que pour le premier dimensionnement, donc pour obtenir une réflectance effective proche de 55 %, il a fallu utiliser 12 couches (au lieu de 8) sur le miroir mobile. De même, pour obtenir un déphasage continu entre 550 et 850 nm, le miroir fixe a nécessité l'utilisation de 13 couches (au lieu de 8).

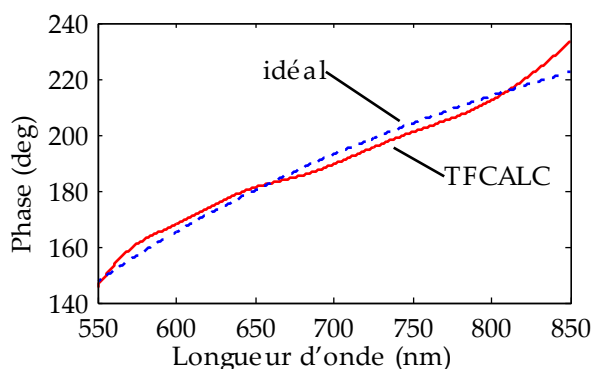


Figure 3.17 : En rouge, valeur de la phase moyenne calculée à partir des valeurs simulées avec le logiciel TFCALC. En pointillés bleu, valeur idéale de la phase pour laquelle le comportement du filtre s'approche du comportement d'un Fabry Péroét idéal.

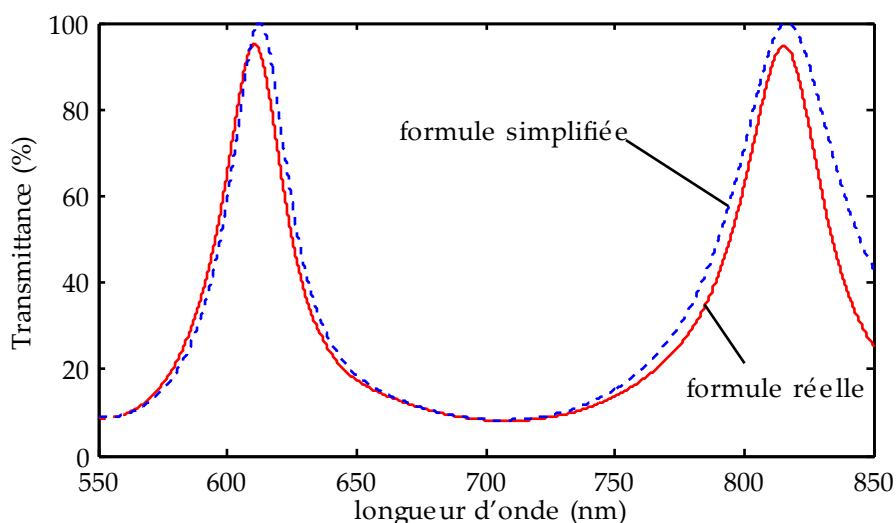


Figure 3.18 : Comparaison de la formule simplifiée (3.1) avec la formule réelle (3.8) donnant la transmittance d'une cavité Fabry Péroét. La figure de transmittance a été calculée à l'aide des réflectances simulées par TFCALC pour un gap d'air de 900 nm pour le Fabry Péroét réel, et de 1225 nm pour le Fabry Péroét idéal.

J'ai tracé dans la figure 3.17 le déphasage moyen en trait continu rouge, et le déphasage idéal (formule (3.14) avec $L = 2$) en pointillé bleu. Contrairement au premier dimensionnement des couches, le déphasage est continu et proche de 180° . Il est de plus quasi-identique au déphasage idéal. La valeur moyenne du gap d'air correctif d_c calculé à l'aide de la formule (3.13) et en posant $L = 2$ vaut : $d_c = 325 \pm 7$ nm, cette valeur de d_c est très stable et ne présente que ± 7 nm d'écarts. Grâce à cela, les maxima de transmittance de ce nouveau dimensionnement sont quasi-similaires à ceux d'un Fabry Péroét idéal, et surtout, comparés à

ceux du premier dimensionnement, ils ne présentent que deux ordres d'interférence d'écart entre le cas réel et le cas simplifié ($m = m'+2$). Cependant, il ne faut pas oublier que le gap d'air physique sera de 325 nm plus faible que le gap d'air optique demandé par le cahier des charges. Ainsi, le gap d'air physique entre les miroirs devra varier entre 500 et 950 nm au lieu de 825 et 1275 nm.

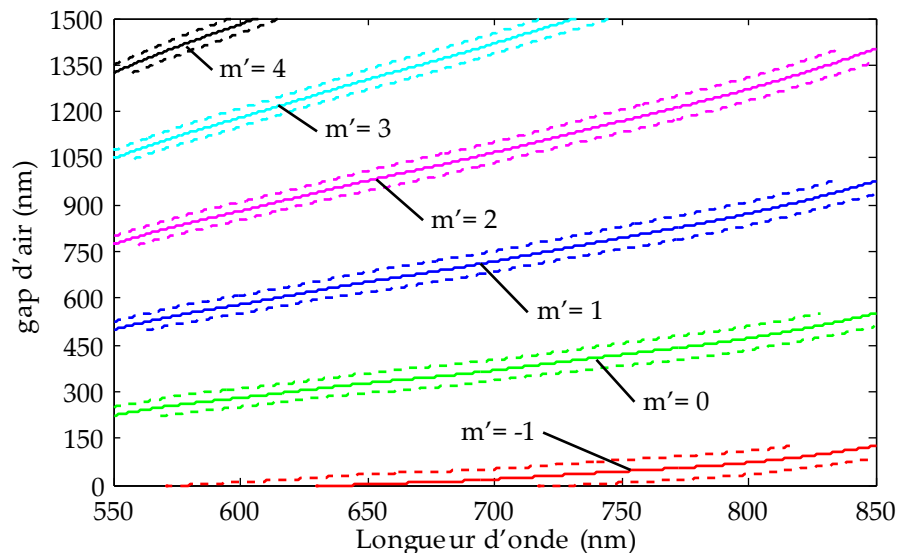


Figure 3.19 : Tracé en fonction de la longueur d'onde, des maxima de transmittance (en trait plein) et de la position de la largeur à mi hauteur (en pointillé). Des couleurs différentes sont utilisées pour représenter les différents ordres d'interférence m' .

Bien que la position des maxima (cf. figure 3.19) soit presque identique à un Fabry Péroto idéal, j'ai décidé d'utiliser le même script MATLAB que précédemment pour calculer les valeurs du FWHM et de l'ISL, car comme montré sur la figure 3.18, la position et la largeur des pics de transmittance varient légèrement. La différence est surtout visible à proximité des infrarouges, il provient de l'écart important (au-delà de 800 nm) du déphasage moyen par rapport au déphasage idéal (cf. figure 3.17).

La valeur du FWHM a été obtenue en mesurant la largeur du pic de transmittance à $T_{\text{moy}} = 51.2\%$. Les résultats présentés dans la figure 3.20a montrent que tous les pics devraient avoir un FWHM inférieur à 150 nm. Cette valeur est plus élevée que pour le premier dimensionnement.

Pour l'intervalle spectral libre (ISL), j'ai choisi de ne déterminer la distance minimale que pour les pics situés entre 550 et 850 nm, car en dehors de cette zone, la réflectance des miroirs baisse rapidement. Les valeurs de l'ISL ainsi obtenues sont tracées dans la figure 3.20b, et se situent entre 108 et 272 nm.

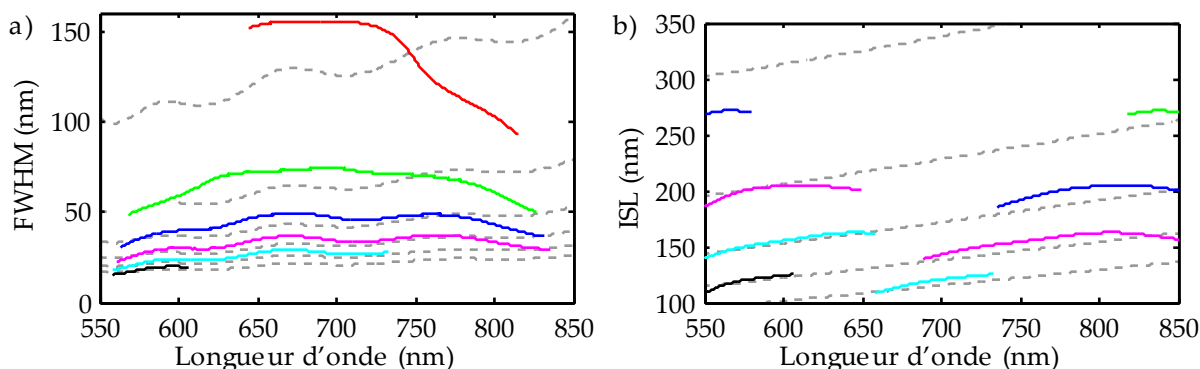


Figure 3.20 : Largeur à mi-hauteur (FWHM), et intervalle spectral libre (ISL) pour le premier dimensionnement des miroirs. Lorsque cela a été possible, les valeurs ont été calculées à l'aide de la formule (3.8) donnant la figure de transmittance de la cavité.

J'ai ensuite comparé les valeurs mesurées du FWHM et de l'ISL, aux valeurs calculées à l'aide des formules simplifiées (3.5) et (3.6) (représentées en pointillés gris dans la figure 3.20).

Ainsi, dans la figure 3.20a, on peut relever que les valeurs du FWHM sont assez différentes des valeurs données par la formule (3.6) : le FWHM augmente rapidement sur environ 550-625 nm, reste stable sur 625-725 nm, et diminue sur 725 et 850 nm.

Quant à l'ISL (figure 3.20b), puisque les positions des maxima sont quasi identiques, je retrouve pratiquement les mêmes valeurs que pour un Fabry Péroï idéal, cependant comme l'écart minimum est déterminé sur une portion limitée de longueurs d'ondes, l'ordre d'interférence change.

En somme, pour le dernier dimensionnement, les positions des maxima et les valeurs d'ISL sont proches d'un Fabry Péroï simplifié, mais les valeurs du FWHM ne sont pas prévisibles par les formules simplifiées d'un Fabry Péroï idéal. Le tableau 3.8 est une synthèse qui regroupe les valeurs moyennes, minimales, et maximales du FWHM et de l'ISL en fonction de l'ordre d'interférence m' .

a) FWHM : (pour $T_{\text{moyen}} = 51.2\%$)				b) ISL :			
ordre m'	moy. (nm)	max. (nm)	min. (nm)	ordre m'	moy. (nm)	max. (nm)	min. (nm)
-1	137.6 ±18.5	155.5	92.9	-1	-	-	-
0	66.6 ±7.3	74.5	48.3	0	270.7 ±1.0	271.7	268.0
1	44.1 ±4.6	49.2	30.5	1	214.4 ±29.2	271.7	185.2
2	32.9 ±3.4	37.2	22.5	2	172.6 ±22.9	204.4	138.7
3	26.3 ±2.7	30.1	18.1	3	136.9 ±15.4	162.7	108.5
4	22.0 ±2.3	25.2	15.3	4	127.4 ±6.6	133.7	108.5

Tableau 3.8 : Valeurs moyenne du FWHM et de l'ISL pour le dernier dimensionnement des miroirs des filtres Fabry Péroï en fonction de l'ordre d'interférence m' .

Le tableau 3.8 montre que ce nouveau dimensionnement a l'avantage de permettre une large variation du FWHM moyen, ce qui offre plus de possibilités de filtrage pour la caméra

multispectrale. Cependant, comparée au FWHM obtenu par le premier dimensionnement, la largeur des pics est en général plus élevée.

Quant à la finesse, les valeurs moyennes, maximales et minimales (calculées à partir du FWHM et de l'ISL) sont listées dans le tableau 3.9 : la valeur moyenne est égale à 5. Cependant, la valeur minimale de la finesse sera de 3.8-3.9. Comparée aux valeurs théoriques (pointillés gris sur la figure 3.21), la valeur de la finesse varie beaucoup plus en fonction de la longueur d'onde. Ceci résulte de la variation importante du FWHM.

ordre m'	moy. (nm)	max. (nm)	min. (nm)
-1	-	-	-
0	5.2±0.1	5.4	5.0
1	5.0±1.4	8.9	3.9
2	5.4±1.3	8.6	3.9
3	5.3±1.1	7.9	3.8
4	6.2±0.5	7.4	5.5

Tableau 3.9 : Valeurs moyenne de la finesse pour le dernier dimensionnement des miroirs en fonction de l'ordre d'interférence m' .

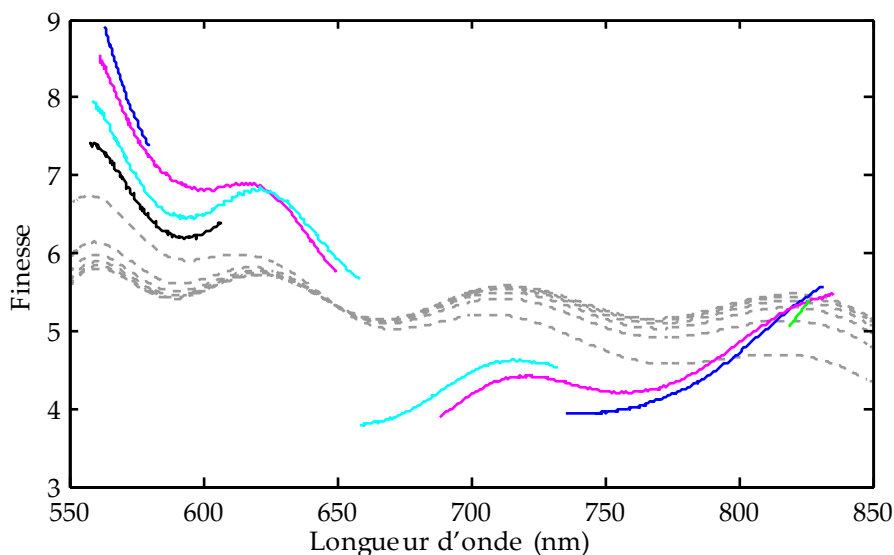


Figure 3.21 : Valeur de la finesse pour le dernier dimensionnement des miroirs. Lorsque cela a été possible, les valeurs ont été calculées à partir des valeurs du FWHM et de l'ISL visibles sur la figure 3.20

Malgré les variations du FWHM, l'ordre d'interférence $m' = 1$ est quasi-équivalent à l'ordre $m = 3$ d'un Fabry Pérot idéal. Cet ordre d'interférence répond donc à toutes les exigences du dernier cahier des charges, car la largeur à mi-hauteur maximale se situe entre 30.5 et 49.2 nm et l'intervalle spectral libre minimum est entre 271.7 et 185.2 nm.

En fin de thèse, j'ai recherché d'autres combinaisons de couches ayant des réflectances plus élevées. La réflectance maximum qui a pu être obtenue pour le miroir mobile est d'environ 50 %, par contre, pour le miroir fixe, une réflectance moyenne de 79 % a été atteinte (figure 3.22).

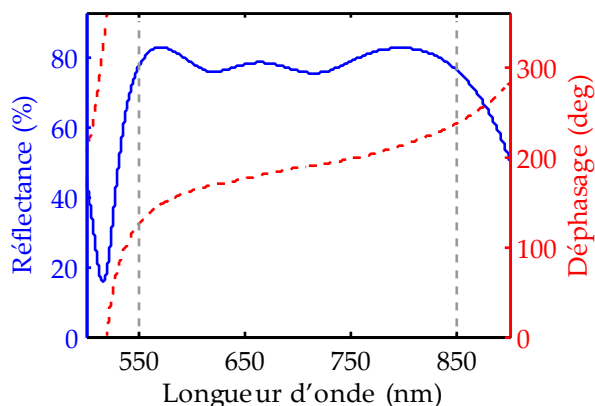


Figure 3.22 : Résultat du dimensionnement d'un multicouche ZnS/YF₃ déposé sur borosilicate ayant une réflectance moyenne de 79 %.

Les épaisseurs à déposer pour ce miroir sont listées dans le tableau 3.10. Notons que ce multicouche est plus épais que pour les dimensionnements précédents.

ZnS (H) / YF ₃ (L) : épaisseur totale 972 nm, 13 couches
Borosilicate / H 100 / L 8 / H 30 / L 134 / H 77 / L 34 / H 25 / L 127.5 / H 71 / L 113 / H 70 / L 113 / H 71 / Air

Tableau 3.10 : Epaisseurs en nm des couches à déposer sur le borosilicate pour fabriquer un miroir fixe ayant une réflectance de 79 %.

Si ce nouveau miroir est utilisé avec la membrane de la figure 3.16b, nous obtiendrons une finesse moyenne d'environ 7, avec une valeur minimale de 4.5. Ces valeurs sont plus élevées que pour les dimensionnements précédents ; mais en contrepartie, à cause d'une différence de 30 % de la réflectance des deux miroirs, la transmittance maximale devient limitée à 72.6 %, inférieure à la valeur de 80 % demandée par le cahier des charges. Ce miroir ne sera donc pas utilisé, mais ce dimensionnement montre qu'il est possible d'avoir une réflectivité plus élevée pour le miroir fixe. Nous pouvons donc, dans une version future, envisager d'ajuster la réflectivité du miroir fixe entre 60 et 75 %, de manière à obtenir une largeur à mi-hauteur plus faible, tout en conservant une transmittivité des filtres supérieure à 80 %.

3.1.4 Conclusion

Dans cette partie consacrée au dimensionnement optique, j'ai dans un premier temps introduit une formule de transmittance des filtres Fabry Péroth qui est plus générale que la formule classique d'un Fabry Péroth idéal symétrique, car elle prend en compte le déphasage et la différence de réflectance des miroirs. Les différences qui ont le plus d'impact sur les dimensionnements des miroirs sont : la transmittance maximale (limitée par l'écart des réflectances des miroirs), et le déphasage à la réflexion.

En pratique, le déphasage à la réflexion modifie les valeurs de la largeur à mi-hauteur et de l'intervalle spectral libre, ce qui ne nous permet pas d'utiliser les formules simplifiées.

Nous avons aussi pu établir que, de manière générale, une variation rapide du déphasage avec la longueur d'onde conduit à un Fabry Péroth ayant un gap d'air optique plus important que le gap d'air physique des miroirs. Cette propriété peut s'avérer utile lorsque les valeurs du gap d'air optique sont trop importantes pour être facilement obtenues à l'aide des techniques de microfabrication.

De même, la valeur du déphasage peut être ajustée pour obtenir une largeur à mi-hauteur (FWHM) et un intervalle spectral libre (ISL) pouvant être constants ou diminuant lorsque la longueur d'onde augmente.

Ces différences sont intéressantes et offrent des possibilités supplémentaires de dimensionnement des miroirs. En effet, il devient possible d'envisager de faire varier la réflectance et le déphasage en fonction de la longueur d'onde pour obtenir des pics de largeur variable en fonction de la longueur d'onde. Mais ces propriétés sont difficiles à obtenir, car il faut prendre en compte la valeur moyenne des déphasages des deux miroirs.

Le dimensionnement des multicouches a été réalisé avec le logiciel TFCALC. Les matériaux utilisés par le miroir mobile (Nitrure de silicium et silice PECVD) ne permettent pas de dépasser 50 % de réflectance. Nous avons donc choisi de rechercher une réflectance plus élevée pour le miroir fixe. Ce miroir n'ayant pas besoin d'un contrôle rigoureux des contraintes résiduelles, nous avons choisi d'utiliser une combinaison ZnS / YF₃. Cette combinaison de matériaux nous a permis d'atteindre une réflectance maximale de 80 %, mais pour maximiser la transmittance du filtre Fabry Péroth, il a fallu diminuer la réflectance du miroir fixe à 58.9 % pour la rapprocher du miroir mobile. Ces réflectances (miroir mobile : 50.2 % ; miroir fixe : 58.9 %) ne permettaient pas de répondre aux premières exigences du cahier des charges, c'est pourquoi une seconde version du cahier des charges a été élaborée.

Avec les miroirs actuels, les performances de filtrage seront loin d'être optimales, car nous aurons une réflectance effective de 55 %, des largeurs à mi-hauteur assez grandes (entre 30.5 et 49.2 nm), et un intervalle spectral libre faible (108-163 nm).

A l'avenir, pour améliorer ces performances, il faudra augmenter la réflectance des miroirs. Dans notre cas, le miroir mobile est celui qui limite le plus les performances, pour s'affranchir de cette limitation, quatre solutions sont envisageables :

- modifier les recettes de dépôt PECVD pour obtenir un contraste d'indice plus élevé ;
- utiliser les mêmes matériaux pour les deux miroirs (il faudra auparavant vérifier la compatibilité chimique du ZnS et du YF₃) ;
- déposer des miroirs mobiles différents pour chaque filtre de la matrice en utilisant des pochoirs ;
- utiliser la première conception de multicouche avec des filtres passe bande pour sélectionner l'ordre d'interférence.

Notons qu'une couche anti-réfléchissante pourrait aussi être déposée sur la face arrière du wafer de borosilicate pour s'affranchir de la réflectance (~4 %) sur cette face et éventuellement pour compenser en partie la contrainte résiduelle du multicouche ZnS/YF₃.

Toutes ces options n'ont pas pu être étudiées dans le temps imparti pour cette thèse, mais elles pourront être étudiées pour élaborer une future version des filtres Fabry Pérot.

L'ajustement des filtres Fabry Pérot nécessite un actionnement intégré du miroir mobile pour modifier le gap physique entre les miroirs. La partie suivante décrit la conception mécanique et électromécanique qui a été réalisée pour répondre à ce besoin.

3.2 Conception mécanique et électromécanique

Pour élaborer la géométrie de la structure mécanique du miroir mobile et de son actionnement, les principaux critères de conception ont été : l'encombrement des structures mobiles, et la planéité du cadre supportant les miroirs.

En effet, le cahier des charges demande des miroirs avec une surface couvrant plus de 50 % de la micro-lentille associée, et conservant une planéité supérieure à 30 nm pic à pic. Les contraintes résiduelles dans la membrane ont aussi un impact sur la planéité de la structure, mais faute de temps ce point n'a été que partiellement examiné. Toutefois la contrainte mécanique résiduelle moyenne dans les membranes-miroirs étant ajustable, on peut penser qu'elles pourront être optimisées pour réduire au maximum les déformations du cadre.

La démarche habituelle de conception d'un actionneur électrostatique micro-usiné consiste à dimensionner les ressorts et la surface des électrodes à partir : de la course maximum souhaitée, de la tension maximum admissible (ou souhaitable), des fréquences de résonance souhaitées, et de la variation de capacité minimum mesurable. La version sur SOI (décrite dans l'annexe E p209) suit à peu près cette démarche. Mais pour la version sur un wafer en silicium simple, une démarche différente a dû être adoptée pour la conception des miroirs mobiles, car nos principaux critères de conception pour la matrice de filtres Fabry Pérot accordables sont l'encombrement et la planéité des miroirs.

Les étapes successives de la conception mécanique et électromécanique qui ont été choisies sont les suivantes :

- choix des gaps d'airs et de la course d'actionnement ;
- détermination de l'espace entre électrodes ;
- choix de la géométrie des miroirs, des électrodes, et des ressorts, compte tenu des marges de fabrication ;
- optimisation à partir de simulations par élément finis (avec le logiciel ANSYS Workbench) de la géométrie des ressorts pour minimiser la déformation du miroir mobile et des électrodes lors de l'actionnement ;
- calcul final de la raideur des ressorts.

Ces différentes étapes sont décrites dans les parties suivantes.

3.2.1 Course d'actionnement du miroir mobile

Le mode d'actionnement choisi pour ajuster le gap physique entre les miroirs est l'actionnement électrostatique. La force électrostatique entre deux électrodes polarisées étant uniquement attractive, le miroir mobile (membrane+cadre en silicium) doit être suspendu via des ressorts encastrés dans le substrat de silicium pour obtenir une force de rappel assurant la possibilité d'une position d'équilibre.

La course d'actionnement du miroir mobile doit prendre en compte la course désirée pour l'ajustement des filtres, la présence possible d'une accélération parasite, et enfin les marges d'assemblage.

Nous avons vu précédemment que pour répondre au cahier des charges de l'imagerie multispectrale, le gap d'air physique des filtres Fabry Pérot doit pouvoir être ajusté sur un intervalle compris entre 500 et 950 nm, soit une course totale de 450 nm. Cependant, l'actionnement électrostatique étant unidirectionnel, il faut en pratique prévoir une course supérieure, et appliquer une tension d'offset pour pré-contraindre les ressorts afin de pouvoir compenser les déplacements bidirectionnels engendrés par des accélérations parasites. La Sagem nous a conseillé de prévoir des accélérations de 5g.

Soit M la masse du miroir mobile, k la constante de raideur totale des ressorts et a l'accélération potentiellement subie. Le déplacement résultant du miroir est donné par :

$$x = \frac{Ma}{k} \quad (3.15)$$

La raideur des ressorts a été évaluée à partir de plusieurs simulations de la structure complète. Je montrerai dans la partie 3.2.4.2 (p84) que la raideur moyenne des ressorts est de 783 Nm^{-1} (par ressort) et que la masse moyenne du miroir mobile est de 11.8 mg. Ainsi, pour une accélération de 5g, la formule (3.15) indique qu'un déplacement supplémentaire de 250 nm doit être prévu pour pré-contraindre les ressorts.

Pour prendre en compte les variations possibles du gap d'air dues aux défauts d'assemblage, une marge de $3.3 \mu\text{m}$ a été prise, ce qui amène la course totale nécessaire à $4 \mu\text{m}$. La structure mécanique devra donc être conçue pour obtenir un déplacement total de $4 \mu\text{m}$ tout en limitant les déformations du cadre de la membrane à moins de 30 nm.

3.2.2 Espace entre électrodes

L'actionnement étant de type électrostatique, la course d'actionnement sera limitée par le phénomène de Pull-in. Rappelons que le Pull-in est une instabilité mécanique conduisant au collage des structures lorsque la force électrostatique devient plus élevée que la force de rappel des ressorts. La tension de Pull-in est prévisible dans les cas simples et on peut montrer (voir ci-dessous) que l'instabilité de Pull-in ne survient que lorsque le déplacement devient supérieur à 1/3 du gap initial.

En effet, la force d'attraction électrostatique entre deux électrodes en vis-à-vis, de surface A , séparées par un gap d'air d , et soumises à une différence de potentiel V , vaut :

$$F_{\text{capa}} = \frac{A\varepsilon_0\varepsilon_r V^2}{2d^2} \quad (3.16)$$

Où ε_0 est la permittivité du vide, et ε_r est la constante diélectrique du milieu entre les électrodes ($\varepsilon_r = 1$ pour l'air).

La somme des forces exercées sur le miroir mobile par l'actionnement électrostatique et par les ressorts de raideur k vaut pour un déplacement x :

$$F_{total} = \frac{A\varepsilon_0\varepsilon_r V^2}{2(d-x)^2} - kx \quad (3.17)$$

Remarque : les accélérations parasites sont implicitement prises en compte dans la valeur de d (voir partie précédente). A l'équilibre, $F_{total} = 0$ et donc :

$$\frac{A\varepsilon_0\varepsilon_r V^2}{2(d-x)^2} = kx \quad (3.18)$$

Le tracé (non représenté ici) de la valeur de la tension en fonction du gap permet de remarquer que la tension d'actionnement passe par un maximum et diminue pour les gaps d'air plus faibles, c'est à dire que la force électrostatique devient supérieure à la force de rappel des ressorts. La valeur du gap d'air minimum pour laquelle la tension atteint son maximum est calculable en dérivant F_{total} en fonction de x , on trouve ainsi :

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{A\varepsilon_0\varepsilon_r V^2}{(d-x)^3} - k \quad (3.19)$$

En injectant l'éq.(3.18) dans l'éq.(3.19) on obtient :

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{2kx}{(d-x)} - k \quad (3.20)$$

La force de rappel du ressort reste donc compensée par l'actionnement électrostatique pour $\frac{\partial F}{\partial x} = 0$, c'est-à-dire pour $x = \frac{d}{3}$. Donc pour éviter le Pull-in il ne faut pas dépasser 1/3 du gap initial sinon il y a collage des deux électrodes. Pour une course de 4 μm il faut donc prévoir un gap entre électrodes de 12 μm . Cette valeur du gap d'air est supérieure au gap d'air entre les miroirs, il faudra donc prévoir une gravure du silicium pour diminuer la hauteur des électrodes par rapport aux miroirs.

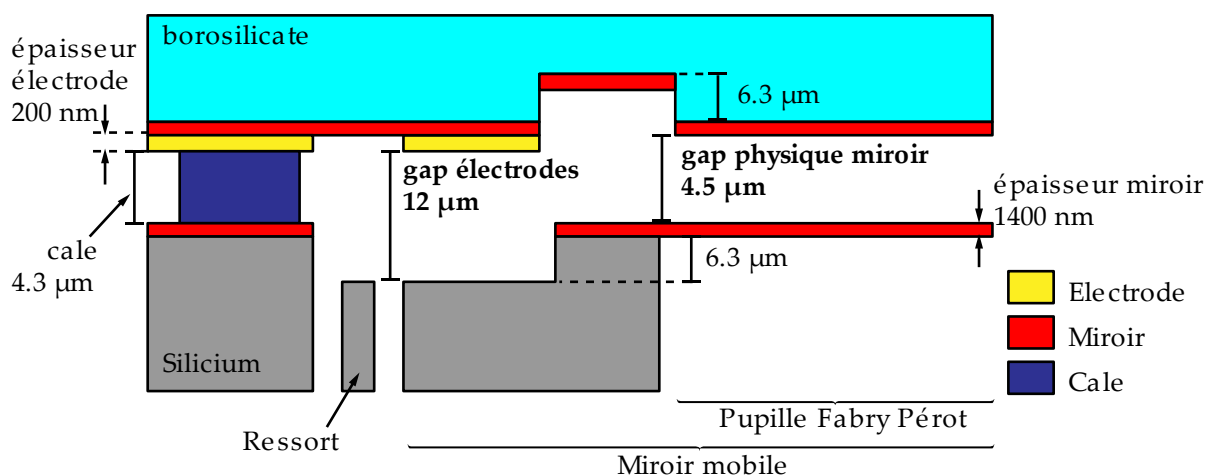


Figure 3.23 : Schéma vue en coupe du Fabry Péroto avec les différentes épaisseurs/profondeurs, toutes déterminées à partir du gap physique entre les miroirs.

Pour résumer les deux parties précédentes, la figure 3.23 montre tous les différents gaps d'air présents entre les électrodes d'actionnement et les miroirs. Il sera nécessaire pour la suite de faire la distinction entre le gap d'air physique des miroirs et le gap d'air entre les électrodes :

Le gap d'air physique entre les miroirs doit pouvoir atteindre la valeur maximale de 4.5 µm pour une course d'actionnement de 4 µm. Ce gap d'air de 4.5 µm comprend : 450 nm pour l'ajustement du filtre, 250 nm pour compenser les accélérations parasites, 3.3 µm pour compenser les défauts d'assemblage, et 500 nm pour le gap d'air physique minimum entre les miroirs (valeur déterminée lors du design optique partie 3.1.3 p55). La valeur de ce gap d'air détermine un certain nombre d'épaisseurs/profondeurs, toutes listées dans la figure 3.23.

Pour éviter l'effet de pull-in, le gap d'air entre les électrodes doit être de 12 µm (trois fois plus élevé que le déplacement de 4 µm des miroirs). Ce gap d'air étant plus élevé que le gap maximum entre miroirs, il faudra donc prévoir dans le procédé de fabrication une étape supplémentaire de gravure du silicium. D'après la figure 3.23, il faudra graver 6.3 µm de silicium pour obtenir un gap d'air initial entre électrodes de 12 µm. La profondeur de la gravure pourra être revue à la hausse ou à la baisse en fonction de la précision de l'assemblage.

La course d'actionnement étant fixée, nous considérons maintenant la conception de la structure mobile, qui doit occuper un minimum de surface, tout en limitant les déformations à moins de 30 nm pic à pic lors d'un déplacement de 4 µm.

3.2.3 Dessin de la géométrie

La géométrie a été dessinée avec le logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) Solidworks. L'utilisation de ce logiciel a permis de définir la forme du MOEMS et de fixer des contraintes de symétrie ou de largeur. Le modèle résultant est simple à modifier et permet de respecter certaines marges de fabrication, telles la largeur du cadre ou la largeur des tranchées.

Dans cette version du MOEMS, l'épaisseur des ressorts est fixée par l'épaisseur du wafer. Des wafers de silicium dans la gamme des 350-400 μm d'épaisseur ont été choisis, car, comparés à des wafers plus fins, ils sont plus simples à manipuler sans rupture. Par contre, l'inconvénient de cette épaisseur est que pour obtenir une raideur des ressorts suffisamment faible, il faut utiliser des ressorts encombrants, car ayant une longueur élevée.

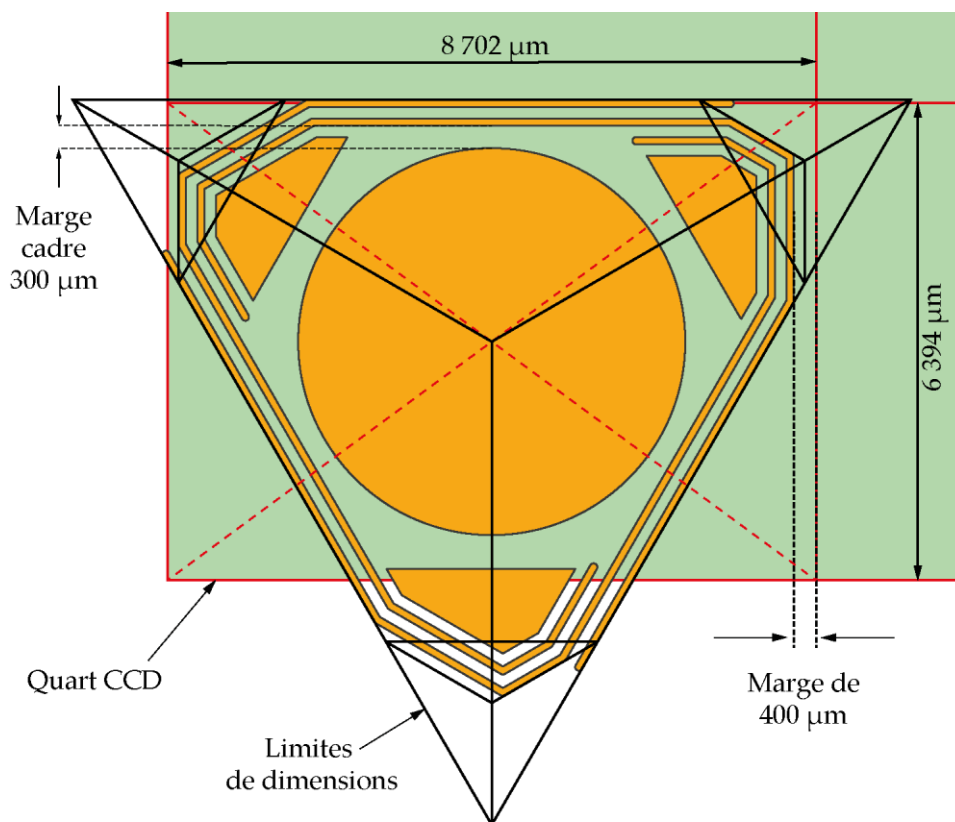


Figure 3.24 : Délimitation de la zone dans laquelle il faut dessiner la géométrie et marges prises pour le premier prototype. La surface totale du CMOS à recouvrir fait 17.405 x 12.787 mm.

Après la planéité des miroirs, la deuxième exigence la plus difficile à satisfaire est celle du taux de remplissage des miroirs dans la matrice, qui selon le cahier des charges, devrait être supérieur à 50 %. Il est en effet requis de disposer 4 filtres côte à côte dans un espace délimité par le capteur CMOS. La taille des miroirs doit donc être maximisée, leur position doit être centrée sur chaque quart du CMOS, et l'encombrement du système d'actionnement du miroir mobile et de ses suspensions doit être minimisé.

Pour limiter l'encombrement des ressorts, j'ai choisi une structure à trois ressorts, définie à l'aide d'un triangle équilatéral dont le barycentre est centré sur chaque quart du CMOS, triangle dont les sommets sont tronqués (figure 3.24). De cette manière, la structure dépasse légèrement la surface occupée par un quart du CMOS, mais permet d'obtenir des ressorts très longs, car le périmètre de la zone dans laquelle la structure peut être dessinée est d'environ 26 mm.

Nous utilisons une gravure DRIE pour découper les ressorts dans le wafer et retirer le silicium sous les miroirs. Donc, pour le dessin de la structure, nous avons pris les marges de fabrication suivantes :

- Les tranchées délimitant la partie mobile et les ressorts ont une largeur de 100 μm de manière à obtenir des temps de gravure courts, compatibles avec une couche de masquage en résine de 6-10 μm d'épaisseur.
- La largeur initiale des ressorts a été fixée à 150 μm . Cette largeur importante est nécessaire pour tenir compte de leur amincissement lors de la dernière étape de gravure isotrope du silicium utilisée dans le procédé (voir la partie 3.3 p91).
- Pour éviter de trop fragiliser le wafer, une marge de 400 μm a été fixée de part et d'autre de l'axe vertical médian du CMOS. Ainsi, le point d'ancrage des ressorts, qui est situé au centre de la matrice, sera relié au reste du wafer par des bras faisant 800 μm de large.
- La largeur du cadre dans lequel est ancrée la membrane a été fixée à 300 μm . Cette largeur est le double de la largeur des ressorts, elle garantit que le cadre conserve une bonne rigidité même après l'amincissement résultant de l'étape de gravure isotrope finale (voir la partie 3.3 p91).
- La structure mécanique est allégée en retirant une partie du silicium sous les électrodes et en conservant une épaisseur d'environ 70 μm . Mais les électrodes devant servir à mesurer le gap d'air entre les miroirs, elles doivent rester planes lors de l'actionnement, c'est pourquoi, pour rigidifier les électrodes, un cadre de 100 μm de large est conservé.

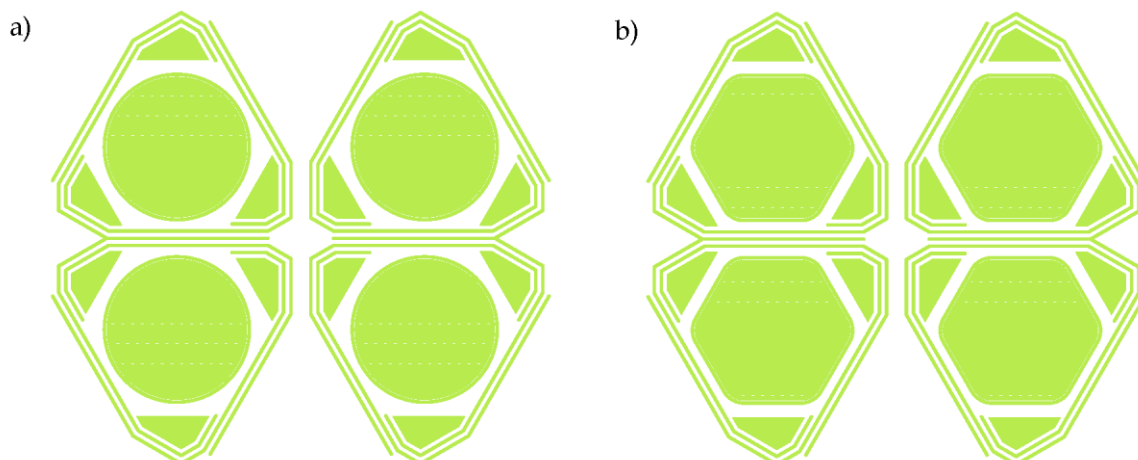


Figure 3.25 : Schéma des deux formes de pupilles proposées, les parties colorées seront gravées.
a) Pupille circulaire. b) Pupille hexagonale.

Deux versions de la structure ont été dessinées : l'une avec une pupille circulaire de 2.6 mm de rayon (cf. figure 3.25a), l'autre avec une pupille hexagonale ayant un apothème de 2.6 mm (cf. figure 3.25b). La pupille circulaire permettra de recouvrir 69 % des lentilles utilisées pour former l'image (cf. partie 3.1.3.1 p55). La pupille hexagonale a été dessinée pour couvrir une surface plus importante : elle recouvre 75 % des lentilles.

L'optimisation de la géométrie a été effectuée en important les modèles 3D (dessinés avec Solidworks) dans le logiciel de simulation multi-physique par éléments finis ANSYS Workbench, afin de modéliser le comportement mécanique des structures.

3.2.4 Simulations mécanique par éléments finis

3.2.4.1 Matrice de raideur du silicium

Dans les simulations mécaniques d'une structure fabriquée sur un wafer en silicium, il est nécessaire de prendre en compte l'anisotropie du module d'élasticité, qui dépend de l'orientation cristalline du wafer et de la direction dans le plan du wafer. En mécanique du solide, la relation entre les composantes σ_{ij} du tenseur des contraintes, et les composantes ε_{ij} du tenseur des déformations internes (strain), est donnée par la loi de Hooke qui s'écrit dans le cas anisotrope avec la convention d'Einstein sur la sommation des indices répétés : (3.21).

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \\ \varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \\ \text{avec } S_{ijkl} = C_{ijkl}^{-1} \end{array} \right\} \text{ avec } i,j,k = 1,2,3 \quad (3.21)$$

Les matrices C_{ijkl} et S_{ijkl} sont respectivement appelées matrice de raideur et matrice de compliance. Ce sont des tenseurs d'ordre 4 avec 81 composantes. Le passage d'une matrice à l'autre se fait en calculant l'inverse de la matrice.

En tenant compte des symétries et en utilisant la notation d'indice groupe de Voigt (11-→1, 22-→2, 33-→3, 23 et 32 →4, 13 et 31→5, 12 et 21-→6), les équations (3.21) peuvent être mises sous la forme simplifiée suivante :

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{\alpha} = \sum_{\beta=1}^6 C_{\alpha\beta} \varepsilon_{\beta} \\ \varepsilon_{\alpha} = \sum_{\beta=1}^6 S_{\alpha\beta} \sigma_{\beta} \end{array} \right\} \quad (3.22)$$

Où les matrices $C_{\alpha\beta}$ et $S_{\alpha\beta}$ n'ont plus que 36 composantes.

En pratique, l'orientation cristalline et le dopage d'un wafer sont identifiables par le nombre et la disposition de méplats découpés en périphérie du wafer (figure 3.26). Pour le silicium

qui a une structure cubique diamant, la direction $[hkl]$ est perpendiculaire au plan $\{hkl\}$ et l'orientation cristalline d'un wafer de silicium est définie par la direction cristalline perpendiculaire à la face du wafer.

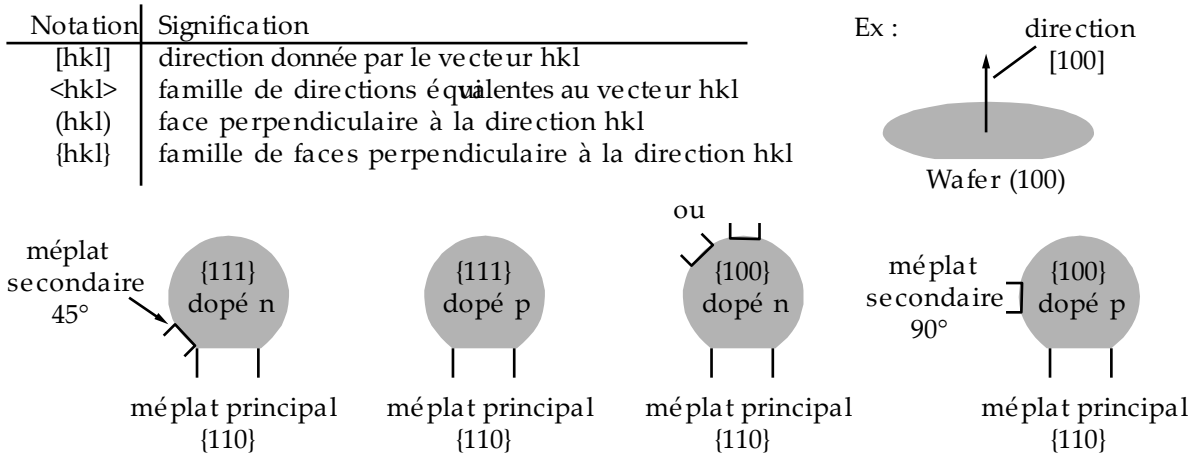


Figure 3.26 : Nomenclature utilisée par les fabricants de wafers pour définir l'orientation cristalline et le dopage d'un wafer à l'aide de la position et du nombre de méplats.

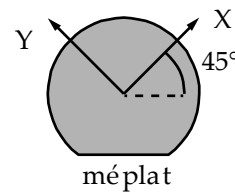
Dans le système des axes cristallins $\{100\}$, la matrice de raideur du silicium d'orientation (100) est donnée par (3.23) [Hopcroft 2010].

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 165.6 & 63.9 & 63.9 & 0 & 0 & 0 \\ 63.9 & 165.6 & 63.9 & 0 & 0 & 0 \\ 63.9 & 63.9 & 165.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 79.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 79.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 79.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \tag{3.23}$$

où les valeurs sont exprimées en GPa.

Les vecteurs de base du repère dans lequel est exprimé cette matrice sont :

$$\mathbf{x}_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{y}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{z}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

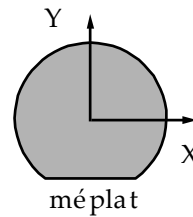


Il est important de noter que sur un wafer (100), ces vecteurs forment un angle de 45° par rapport au méplat principal. Donc, si on veut utiliser la matrice (3.23) pour la simulation d'un MEMS fabriqué sur un wafer (100) avec des ressorts parallèles au méplat, il faut appliquer un changement d'axes pour calculer la bonne matrice de raideur. Sans cela, les valeurs de raideurs sont faussées et peuvent produire des erreurs pouvant atteindre 5 à 45 % sur les déformations ou les fréquences de résonance.

Dans notre cas, nous ne pourrions pas utiliser de wafers orientés (100), car la structure mobile est triangulaire. A la place, nous utiliserons des wafer de silicium orienté (111), car les constantes élastiques sont identiques dans toutes les directions dans le plan du wafer [Kaajakari 2009 ; Kim 2001].

Il est donc nécessaire de calculer la nouvelle matrice de raideur correspondant à des wafers d'orientation (111). Pour cela j'ai rédigé un script MATLAB à partir de la référence [Kaajakari 2009]. Le script (dont les étapes du calcul sont détaillées ci-dessous) fait une rotation de la matrice (3.26) pour obtenir la nouvelle matrice de raideur sur la nouvelle base (définie ci-dessous) correspondant à un wafer orienté (111) :

$$\mathbf{x}_1 = \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ 2 \end{pmatrix}, \mathbf{y}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{z}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$



Les axes de la nouvelle base ont été choisis de la manière suivante :

- la direction \mathbf{z}_1 perpendiculaire à la face du wafer ;
- la direction \mathbf{y}_1 est perpendiculaire au méplat principal du wafer, car la face du méplat fait partie de la famille {110}, la deuxième composante de ce vecteur est négative pour que le produit scalaire $\mathbf{z}_1 \cdot \mathbf{y}_1$ soit nul ;
- et enfin, pour obtenir un vecteur parallèle au méplat du wafer, la direction \mathbf{x}_1 est obtenue à l'aide du produit vectoriel $\mathbf{x}_1 = \mathbf{y}_1 \wedge \mathbf{z}_1$.

La matrice de passage P est ensuite simplement définie par les vecteurs \mathbf{x}_1 , \mathbf{y}_1 , et \mathbf{z}_1 divisés par leurs modules (3.24), car les vecteurs \mathbf{x}_1 , \mathbf{y}_1 , et \mathbf{z}_1 sont exprimés dans la base définie par les vecteurs \mathbf{x}_0 , \mathbf{y}_0 , et \mathbf{z}_0 .

$$P = \begin{pmatrix} \frac{\mathbf{x}_1}{|\mathbf{x}_1|} & \frac{\mathbf{y}_1}{|\mathbf{y}_1|} & \frac{\mathbf{z}_1}{|\mathbf{z}_1|} \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

Enfin, la nouvelle matrice de raideur est calculée en utilisant la formule (3.25) [Kaajakari].

$$C'_{ijkl} = \sum_{p,q,r,s=1}^3 P_{pi} P_{qj} P_{rk} P_{sl} C_{pqrs} \quad (3.25)$$

Les valeurs à entrer dans ANSYS sont obtenues en inversant la matrice de raideur C'_{ijkl} pour avoir la matrice de compliance S'_{ijkl} : en effet, les valeurs du module de Young E, du coefficient de poisson ν , et du module de cisaillement G, peuvent être calculées à partir de cette matrice en fonction des directions x, y, et z (voir matrice (3.26)). De plus, pour le

silicium de symétrie cubique : $\nu_{xy} = \nu_{yx}$, $\nu_{xz} = \nu_{zx}$, et $\nu_{yz} = \nu_{zy}$, il suffira donc d'entrer 9 valeurs dans ANSYS pour prendre en compte l'anisotropie du module d'élasticité.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{yx}/E_y & -\nu_{zx}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{xy}/E_x & 1/E_y & -\nu_{zy}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{xz}/E_x & -\nu_{yz}/E_y & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{zx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Le tableau 3.11 donne les valeurs calculées des constantes élastiques qui ont été utilisées dans pour les simulations mécaniques avec le logiciel ANSYS pour simuler le MOEMS fabriqué sur un wafer (111).

E_x	173.66 GPa	E_y	173.66 GPa	E_z	187.65 GPa
ν_{xy}	0.241	ν_{yz}	0.166	ν_{xz}	0.166
G_{xy}	69.95 GPa	G_{yz}	60.40 GPa	G_{zx}	60.40 GPa

Tableau 3.11 : Valeurs à entrer dans ANSYS pour simuler un MOEMS fabriqué sur un wafer (111).

Pour observer les différences de déformation obtenues par des structures fabriquées sur les wafers (100) et (111), nous avons simulé les structures sur ces deux types de wafers avec ANSYS Workbench, en utilisant la matrice de raideur (3.23) pour le wafer (100), et la matrice de raideur du tableau 3.11 pour le wafer (111).

Les résultats sont présentés dans la figure 3.27. Il est clairement visible que la structure simulée sur un wafer (100) (figure 3.27a) aura des ressorts de raideur différente, car le déplacement du cadre est dissymétrique ; alors que la structure simulée sur un wafer (111) (figure 3.27b) donne la même déformation suivant les différents axes de symétrie de la structure.

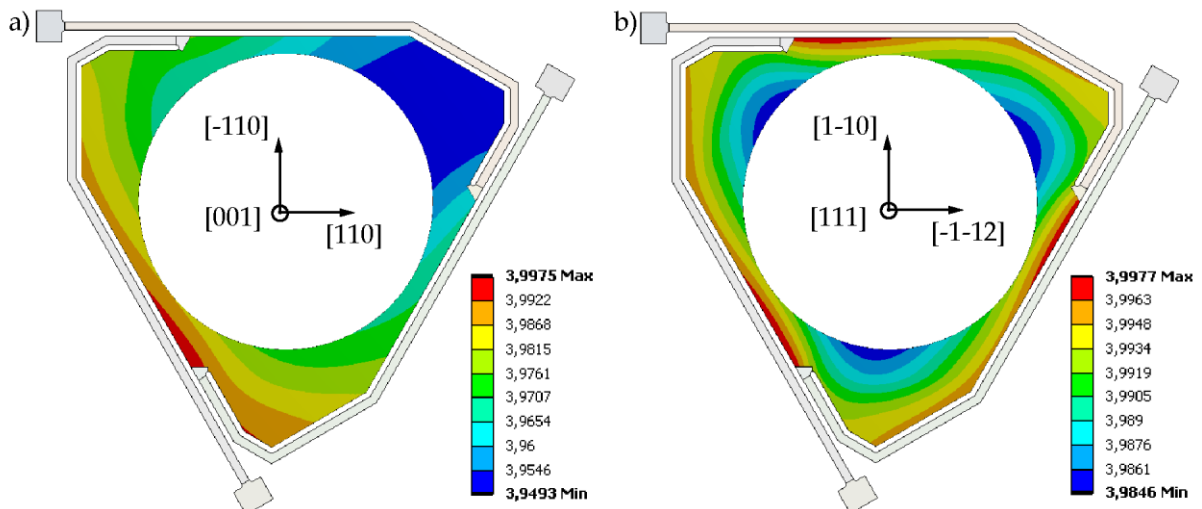


Figure 3.27 : Comparaison des déformations (en μm) du cadre et des électrodes pour un déplacement de $4 \mu\text{m}$ avec : a) un wafer (100) ; b) un wafer (111).

3.2.4.2 Optimisation de la géométrie

a) Longueur des ressorts

Vu la nécessité d'obtenir une structure qui soit à la fois compacte et symétrique, nous n'avons pas à notre disposition un grand nombre de paramètres permettant d'optimiser la structure. Ainsi, l'optimisation a principalement consisté à rallonger les ressorts, jusqu'à ce que les déformations du cadre et des électrodes soient inférieures à 30 nm lors d'un déplacement de 4 μm . Plusieurs structures ont été dessinées (cf. figure 3.28), le tableau 3.12 regroupe les principaux résultats de ces simulations.

Structure	1 ^{ère} géométrie	2 ^{ème} géométrie	géométrie retenue
Longueur du ressort	5.5 mm	8.19 mm	10.13 mm
Raideur par ressort	4605 N.m ⁻¹	1496 N.m ⁻¹	757 N.m ⁻¹
Surface par électrode	3.66 mm ²	3 mm ²	2.58 mm ²
Tension actionnement (déplacement 4 μm)	270 V	170 V	130 V
Déformation du cadre (déplacement 4 μm)	217 nm	59 nm	15 nm
Déformation électrode (déplacement 4 μm)	43 nm	135.9 nm	13 nm
Fréquence résonance 1 ^{er} mode (tambour)	5.59 kHz	3 kHz	2.19 kHz

Tableau 3.12 : Résultats de simulations de 3 structures avec des ressorts de longueur différente, et une épaisseur fixe de 370 μm .

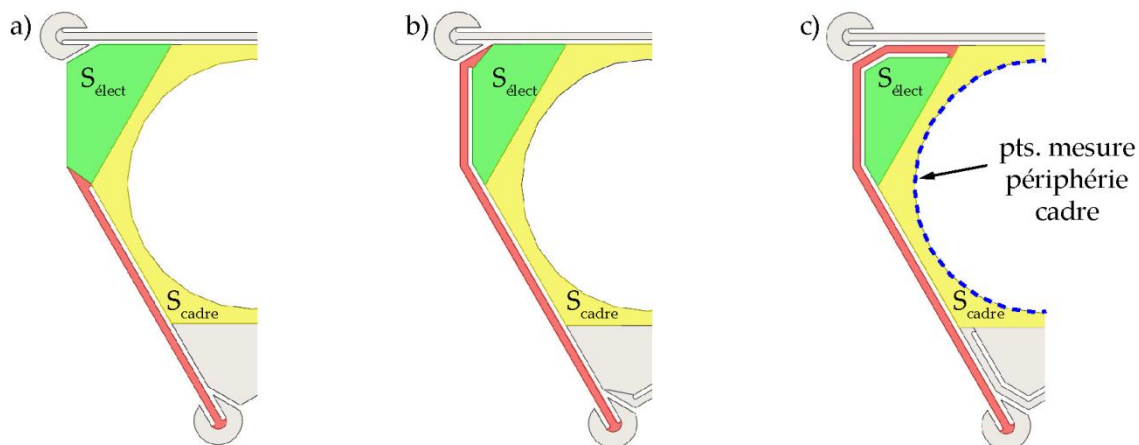


Figure 3.28 : Schéma représentant en rouge les différentes longueurs de ressorts simulées dans le tableau 3.12. : a) 5.5 mm ; b) 8.19 mm ; c) 10.13 mm. Les déformations des électrodes et du cadre ont été mesurées sur les surfaces vertes et jaunes.

Le tableau 3.12 montre que pour obtenir des déformations du cadre et des électrodes inférieures à 30 nm, il a été nécessaire d'allonger les ressorts de 5.5 mm à 10.13 mm. Cette longueur correspond à une raideur de 757 N/m par ressort, il faut donc appliquer une force $F = kx$ de 3.04 mN par électrode pour obtenir un déplacement de 4 μm .

L'allongement des ressorts a pour conséquence d'imposer une diminution de la surface des électrodes et une baisse des fréquences de résonance. Malgré ces deux inconvénients, la géométrie utilisant des ressorts de 10.13 mm de long est celle qui a été retenue, car les

déformations du cadre et des électrodes sont les plus faibles avec 15-13 nm. Avec l'allongement des ressorts, la tension d'actionnement sera, elle aussi, la plus faible.

b) Modification du maillage

Les déformations à étudier sont dans la gamme nanométrique. Pour les simulations précédentes un maillage de type tétraédrique (figure 3.29a) de 30 000 éléments a été utilisé. Ce maillage fournit des résultats suffisamment précis pour tester différentes longueur de ressorts, mais n'est pas suffisamment précis pour simuler la planéité du cadre au nanomètre près. Par exemple, même en utilisant la matrice de raideur d'un wafer (111), la déformation du cadre visible n'est pas identique suivant les différents axes de symétrie de la structure (ces différences proviennent d'un maillage de mauvaise qualité cf. figure 3.30a).

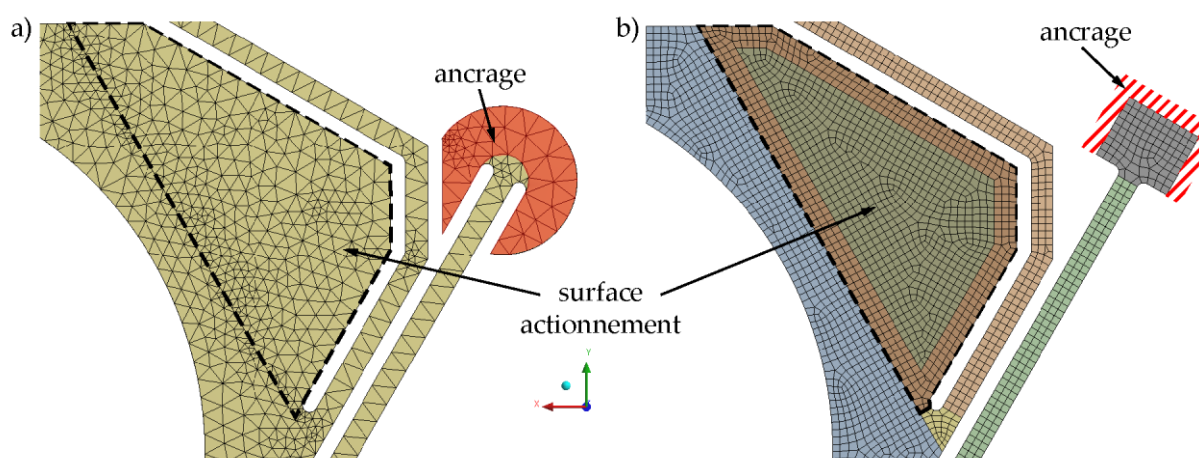


Figure 3.29 : a) Maillage automatique tétraédrique de 30 000 éléments utilisé pour trouver la longueur des ressorts pour laquelle les déformations seraient inférieures à 30 nm pour un déplacement de 4 μm .

b) Second maillage, parallélépipédique, plus fin (58 000 éléments) utilisé pour simuler les déformations du cadre et des électrodes. La structure a été au préalable découpée en plusieurs blocs pour faciliter son maillage.

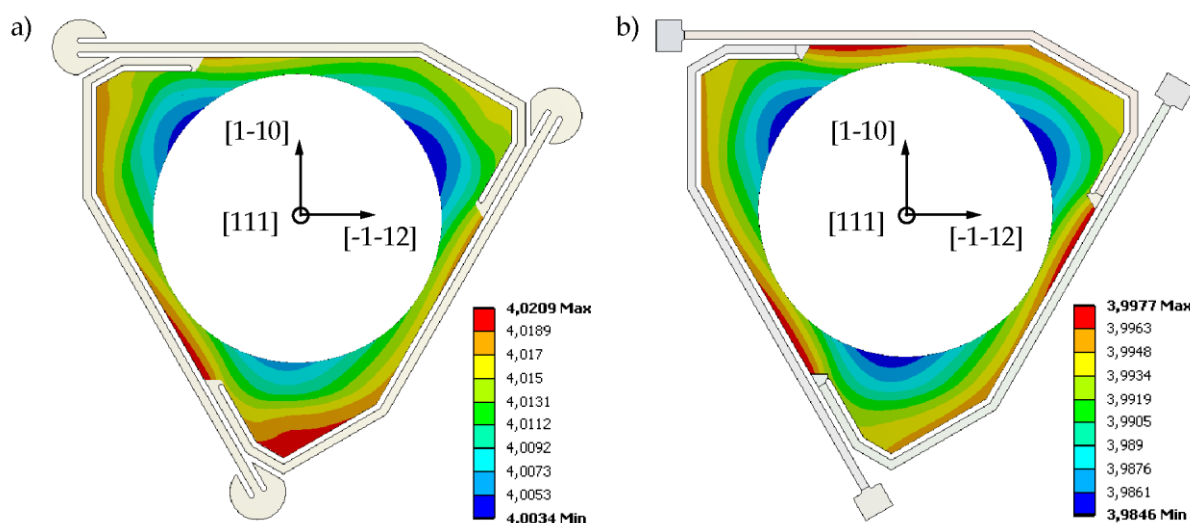


Figure 3.30 : Comparaison des déformations (en μm) du cadre et des électrodes pour un déplacement de 4 μm avec en a) le maillage tétraédrique, en b) le maillage fin.

Ainsi, dans les simulations qui suivent, un maillage de type parallélépipédique (figure 3.29b), plus régulier, et beaucoup plus fin avec 58 000 éléments a été utilisé. Pour faciliter ce maillage sous ANSYS, la structure a été divisée en plusieurs blocs visibles dans la figure 3.29b. La figure 3.30 permet de comparer les déformations obtenues selon le maillage. Comme attendu, le maillage plus fin utilisé dans la figure 3.30b permet d'obtenir des déformations identiques suivant les différents axes de symétrie de la structure.

Le maillage de la figure 3.29b est composé de 58 000 éléments, un maillage parallélépipédique beaucoup plus fin composé de 235 000 éléments a aussi été essayé, mais ce maillage ne modifie pratiquement pas les résultats. Donc le maillage composé de 58 000 éléments est suffisamment fin pour étudier les effets de l'épaisseur des wafers sur les performances de la structure.

c) Effet de la variation d'épaisseur des wafers

Avec le procédé de fabrication proposé, la principale source d'erreur proviendra des variations d'épaisseur du wafer, elle proviendra aussi de la variation de largeur du cadre et des ressorts causée par la gravure isotrope du silicium qui aura lieu en fin de fabrication (voir partie 3.3 p91). Dans la suite, est uniquement étudié l'impact de la variation d'épaisseur des wafers sur les caractéristiques de la structure.

Les tableaux qui suivent regroupent les résultats des simulations réalisées sur des wafers d'épaisseur différente. Les déformations sont listées dans le tableau 3.13, les raideurs et tension d'actionnement dans le tableau 3.14, et les fréquences de résonance dans le tableau 3.15. Il est intéressant de remarquer que le nouveau maillage donne des résultats quasi-identiques à ceux obtenus avec le maillage tétraédrique (cf. tableau 3.12). Ceci confirme qu'un maillage tétraédrique est suffisant pour l'évaluation de ces quantités.

Epaisseur Si	350 μm	370 μm	400 μm
déformée électrodes	9.8 nm	9.4 nm	9.0 nm
déformée cadre	13.1 nm	12.4 nm	11.9 nm
déformée périphérie cadre	8.8 nm	8.8 nm	9.0 nm

Tableau 3.13 : Déformée pic à pic du cadre et des électrodes simulées pour différentes épaisseurs de wafer et un déplacement de 4 μm .

Le tableau 3.13 regroupe les déformations mesurées pour différentes épaisseurs de wafer. Dans ce tableau, nous faisons la distinction entre la déformation du cadre et la déformation de la périphérie du cadre (cf. figure 3.28). Cette distinction est nécessaire car les résultats expérimentaux présentés dans la partie 4.5.3 (p132) montreront que la déformée des miroirs sous forme de membrane dépend uniquement de la planéité de la périphérie du cadre dans lequel est encadrée la membrane. Nous trouvons que pour un déplacement de 4 μm , les déformées de la périphérie du cadre sont très faibles et varient peu avec l'épaisseur du wafer (8.8-9 nm). Ces déformations du bord du cadre sont même plus faibles que celles observées sur l'intégralité du cadre qui se situent entre 13.1-11.9 nm. Enfin, la déformée des électrodes en fonction de l'épaisseur du wafer est elle aussi assez faible et reste entre 9.8-9.0 nm. Donc,

de manière générale, les déformations du cadre causées par l'actionnement seront très faibles, et bien inférieures aux 30 nm de déformation visés.

Le tableau 3.14 donne la raideur de chaque ressort. Entre l'épaisseur minimale et maximale des wafers, la raideur augmente de plus d'un tiers. La tension maximum d'actionnement requise pour un déplacement de 4 μm avec un gap d'air initial de 12 μm a également été évaluée à l'aide de la formule (3.27). Pour une épaisseur de wafer dans la gamme 350-400 μm , la tension maximale d'actionnement varie de 122 à 144 V. Quant à la tension minimale d'actionnement, elle n'a pas encore pu être estimée, car elle dépendra de la précision de l'assemblage des wafers, laquelle n'a pas pu être évaluée au cours de cette thèse.

Epaisseur Si (μm)	350 μm	370 μm	400 μm
Raideur par ressorts (N.m^{-1})	663.8	761.4	923.1
Tension actionnement (V)	122.0	130.7	143.9

Tableau 3.14 : Raideur de chaque ressort et tension d'actionnement calculés à partir de (3.27) pour obtenir un déplacement de 4 μm avec un gap d'air initial de 12 μm .

$$V = \sqrt{\frac{2kx(d-x)^2}{A\varepsilon_0\varepsilon_r}} \quad (3.27)$$

Le tableau 3.15 regroupe les fréquences de résonance de la structure en fonction de l'épaisseur ; les différents modes de résonance sont visibles sur la figure 3.31.

Epaisseur Si	350 μm	370 μm	400 μm
F res 1er mode (Hz)	2 131	2 225	2 363
F res 2eme mode (Hz)	3 161	3 308	3 525
F res 3eme mode (Hz)	3 161	3 308	3 525
F res 4eme mode (Hz)	4 076	4 084	4 094
F res 5eme mode (Hz)	4 076	4 084	4 094
F res 6eme mode (Hz)	4 649	4 658	4 671

Tableau 3.15 : Fréquences de résonance simulées pour différentes épaisseurs de wafer.

Les valeurs reportées dans le tableau 3.15 montrent que toutes les fréquences de résonance sont dans le domaine audible et sont toutes situées dans la gamme étroite de fréquences 2.1-4.6 kHz. Ceci n'est pas favorable pour l'immunité des filtres aux perturbations sonores et aux vibrations usuelles observées dans les systèmes embarqués.

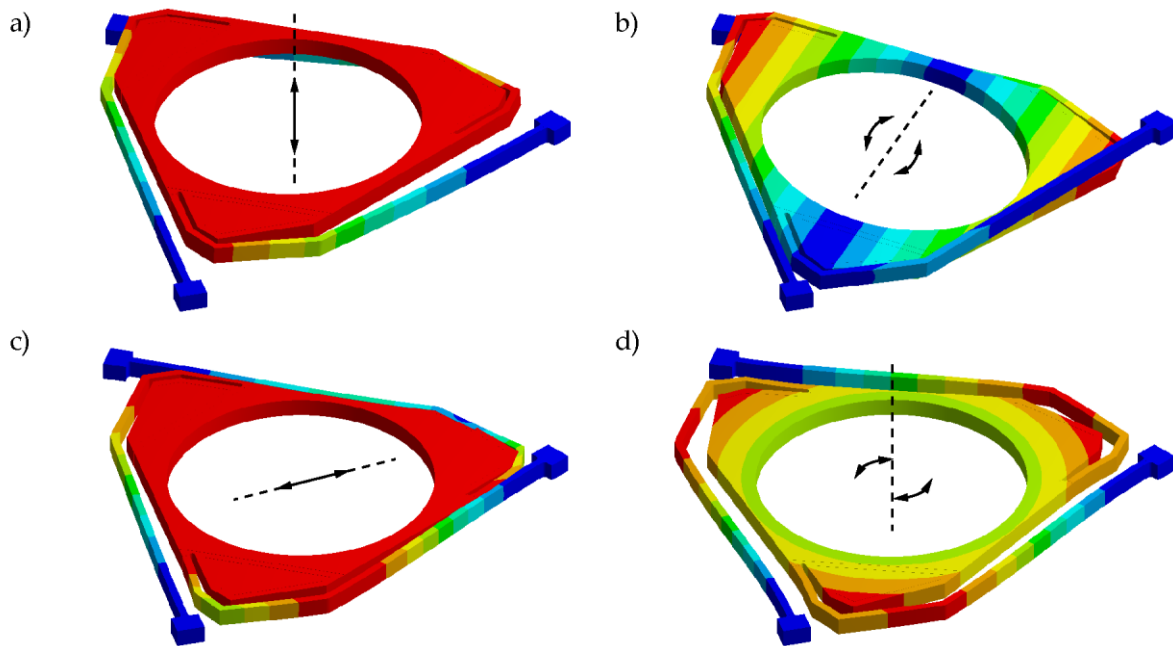


Figure 3.31 : a) Fréquence de résonance 1 : mode tambour.
 b) Fréquence de résonance 2, 3 : inclinaison du cadre.
 c) Fréquence de résonance 4, 5 : translation dans le plan.
 d) Fréquence de résonance 6 : rotation dans le plan.

La figure 3.31 présente la forme des six premiers modes de vibrations. Quatre modes de résonance ont été identifiés pour le cadre : mode tambour, inclinaison, déplacement dans le plan et rotation dans le plan. Les autres modes de résonance (ceux des ressorts, non représentés ici) sont tous situés au-delà de 20 kHz.

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (3.28)$$

$$M = k \left(\frac{1}{2\pi f_{res}} \right)^2$$

Epaisseur Si (μm)	350 μm	370 μm	400 μm
masse avec ressort (Solidworks) (mg)	13.48	14.20	15.29
masse sans ressort (Solidworks) (mg)	9.76	10.27	11.04
masse déduite Fres, raideur (Eq.(3.28)) (mg)	11.11	11.69	12.56

Tableau 3.16 : Tableau regroupant la masse de la structure calculée sous Solidworks avec et sans ressorts, puis calculée à l'aide de la formule (3.28) en utilisant la fréquence de résonance du 1^{er} mode de résonance et la raideur des ressorts.

Dans notre cas, le mode tambour et l'inclinaison du cadre seront les plus gênants. Il aurait été préférable d'avoir des fréquences de résonance supérieures à 10 kHz mais ceci n'est pas réalisable. En effet, la fréquence de résonance d'une structure masse/ressort (eq.(3.28)) est proportionnelle à $(k/M)^{1/2}$, où k est la rigidité cumulée des ressorts et M la masse de la structure. Pour augmenter la fréquence de résonance d'un facteur 5, il faudrait avoir une rigidité 25 fois plus grande, ou une masse 25 fois plus faible. Mais comme l'indiquent les tendances du tableau 3.12, si la raideur des ressorts est augmentée, les déformations du cadre

deviendront trop importantes. De plus, toujours d'après le tableau 3.12, même les ressorts les plus courts (5.5 mm de longueur) ne sont pas suffisamment rigides pour obtenir une fréquence de résonance supérieure à 10 kHz. Quant à la masse, il n'est pas envisageable de la réduire fortement, car d'après le tableau 3.16, l'essentiel de la masse de la structure provient du cadre, or il n'est pas possible de diviser son volume par 25 sans réduire sa rigidité.

Il n'est donc pas possible d'augmenter les fréquences de résonance par une simple modification de la géométrie de la structure. Cependant, le faible gap d'air entre les miroirs favorise un important amortissement visqueux (appelé "squeeze film damping"). Le calcul de l'amortissement visqueux de la structure n'a pas été entrepris pendant cette thèse, en raison de sa complexité dans le cas des filtres considérés, puisqu'il nécessiterait de tenir compte de la flexibilité de la membrane. Il est donc préférable de réaliser la structure pour mesurer l'amortissement obtenu, et éventuellement comparer ces résultats à des simulations ou à des formules analytiques. Si l'immunité aux vibrations n'est pas suffisante il faudra concevoir une électronique de contrôle pour amortir les vibrations, qui présentent quand même l'avantage d'être dans une gamme restreinte de fréquences.

3.2.5 Conclusion

Une géométrie de matrice de 4 filtres Fabry Pérot accordables a été conçue et dimensionnée pour être fabriquée sur des wafers en silicium et en borosilicate. Toutes les limites du procédé de fabrication n'étant pas connues, cette première version en technologie silicium a été conçue pour être robuste, avec des marges de fabrication larges. Avec la structure actuelle, la pupille circulaire permettra de recouvrir 69 %, et la pupille hexagonale 75 %, des lentilles utilisées pour former l'image (cf. partie 3.1.3.1 p55).

La structure mobile supportant les miroirs est constituée d'un cadre triangulaire en silicium suspendu par 3 ressorts. Pour s'affranchir de l'anisotropie mécanique du silicium (100), cette structure a été conçue pour du silicium d'orientation (111). Elle est prévue pour être actionnée par voie électrostatique à l'aide de 3 électrodes situées dans les coins du triangle, et de 3 électrodes en vis-à-vis sur le wafer en borosilicate sur lequel est déposé le miroir fixe.

Les électrodes ont été enterrées pour s'affranchir du phénomène de collage électrostatique (Pull-in) pour les faibles gaps d'air entre les miroirs. Bien que d'un point de vue optique la course nécessaire soit seulement de 450 nm, une course d'actionnement beaucoup plus grande (4 μm) comprenant une précontrainte des ressorts (par une tension d'offset) a été prévue pour pouvoir compenser une accélération de 5g, et des défauts d'assemblage. Une telle course est aussi intéressante pour des filtres Fabry Pérot fonctionnant à des longueurs d'onde plus élevées.

Des modélisations mécaniques et électromécaniques ont été effectuées pour optimiser le dimensionnement de la structure mobile et des ressorts, afin d'obtenir une structure très compacte et très peu déformable (< 14 nm) lors de l'actionnement. La conception proposée

est compatible avec le cahier des charges et devrait être robuste vis-à-vis des variations technologiques. En particulier, la variation d'épaisseur des wafers de silicium (qui a un impact sur la rigidité des ressorts et la tension d'actionnement) a été prise en compte dans le dimensionnement.

Les modélisations montrent qu'une tension d'actionnement élevée sera nécessaire (< 122 V ou < 144 V selon l'épaisseur du wafer) en raison de l'espacement initial important entre les électrodes ($12\ \mu\text{m}$) et de leur surface limitée. On pourrait montrer que malgré tout, ces valeurs restent inférieures à la tension nécessaire pour créer une décharge dans le gaz situé dans le gap inter électrodes à pression atmosphérique. Cette valeur de tension maximale pourra être réduite si le procédé de fabrication permet une réduction de la largeur des ressorts et des gaps. Il est cependant utile de remarquer qu'une variation de seulement 5-10 V sera suffisante pour l'ajustement du gap optique en cours de fonctionnement.

Le dimensionnement n'a pas permis d'augmenter la fréquence de résonance du mode fondamental (piston) au-delà de ~ 2 kHz. Cette valeur est a priori trop faible pour s'affranchir des variations du gap des filtres avec les perturbations vibratoires (acoustique ou autres) rencontrées dans les systèmes embarqués. Cependant l'important amortissement visqueux escompté, associé à la possibilité d'un asservissement du gap, devrait permettre de surmonter cette limitation.

Nous n'avons considéré dans cette partie que l'actionnement en mode piston, mais notons que la présence de 3 paires d'électrodes indépendantes permettront également : une compensation des écarts de raideurs des ressorts ; un très léger ajustement du parallélisme des miroirs (quelques $1/100^\circ$) ; et la mesure ainsi que l'asservissement du gap d'air entre les miroirs. Pour cela une mesure intégrée du gap physique à partir des capacités inter-électrodes sera nécessaire. Cette détection capacitive n'a pas été analysée, mais on peut penser qu'elle est réalisable, car les techniques de détection capacitive actuelles permettent de mesurer des variations relatives de capacité très inférieures à 10^{-3} , même avec des capacités très faibles. Ce point ainsi que l'amortissement de la structure en régime dynamique devront être analysés dans l'avenir pour concevoir une électronique de contrôle.

La partie suivante décrit le procédé de fabrication envisagé.

3.3 Etapes du procédé de fabrication

Durant cette thèse, deux procédés de fabrication ont été analysés. Les deux procédés diffèrent par le type de substrat utilisé. Le premier utilise un wafer SOI, le second utilise un wafer en silicium. Du point de vue de la conception, la différence entre les deux se situe principalement sur la partie mobile et sur la disposition des électrodes d'actionnement. La version sur wafer SOI a été envisagée en premier. Cependant des tests technologiques ont montré que cette version sur SOI est difficile à réaliser. C'est pourquoi le procédé de fabrication a été largement modifié en milieu de thèse pour aboutir à une deuxième version, plus simple à fabriquer et utilisant un simple wafer en silicium pour le miroir mobile. Dans la suite de cette partie, la version utilisant le wafer simple est présentée en détail. La version sur SOI n'est décrite qu'en annexe (voir l'annexe E p209).

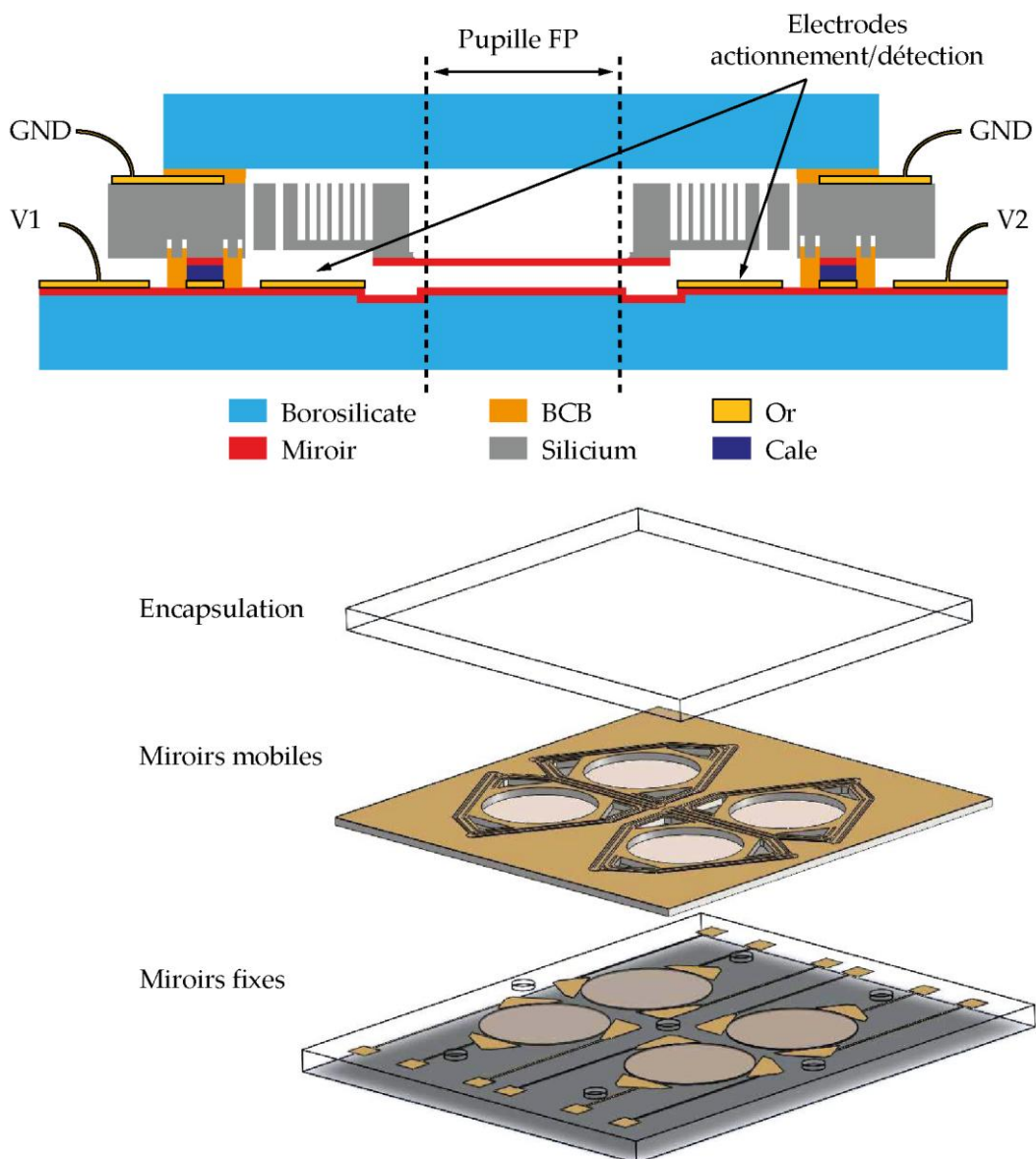


Figure 3.32 : En haut, vue en coupe pour un filtre. En bas, vue 3D éclatée de l'assemblage envisagé.

La figure 3.32 montre une vue en coupe, et une vue 3D éclatée du MOEMS envisagé. Le procédé a été conçu pour être robuste, de complexité minimum et ne nécessitant qu'un faible nombre d'étapes de fabrication après la libération de la membrane du miroir mobile. Ce dernier point est important, car il diminue le risque de contamination du miroir mobile.

Pour rappel, comme déjà dit dans l'introduction du Chapitre 3 (p47), cette structure possèdera trois électrodes, situées dans les coins du triangle. Le MOEMS est un assemblage de trois wafers : un wafer en borosilicate pour le miroir fixe, un wafer en silicium pour la partie mobile, et un dernier wafer en borosilicate pour l'encapsulation.

Des découpes pratiquées à la scie diamant donnent au MOEMS une structure pyramidale, qui permet d'avoir tous les contacts électriques du même côté : la structure mobile sera mise à la masse, le parallélisme et le gap d'air seront ajustés en modifiant le potentiel des électrodes déposées sur le wafer en borosilicate contenant le miroir fixe. Enfin, pour éviter de déposer des électrodes sur la structure mobile, nous utiliserons des wafers en silicium fortement dopé.

3.3.1 Miroir mobile

Les étapes du procédé de fabrication proposé pour le miroir mobile sont les suivantes :

Le procédé de fabrication débute par le dépôt du multicouche diélectrique sur l'ensemble du wafer pour bénéficier de la surface la plus lisse possible et obtenir des miroirs peu rugueux. Les miroirs sont ensuite en partie protégés avec un masque de résine, puis les zones non protégées sont gravées dans une solution d'acide fluorhydrique tamponné (BHF).

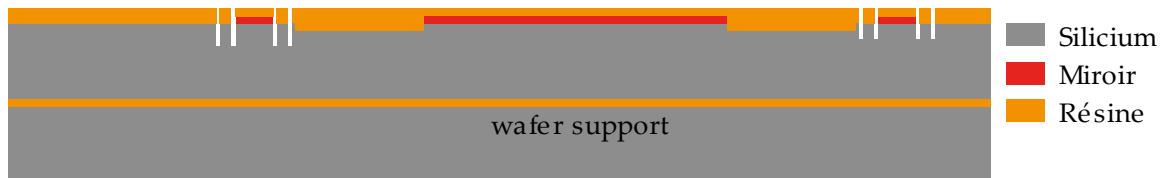


Le miroir est ensuite recuit à environ 700-800 °C pour obtenir des contraintes résiduelles en tension. Il est important de remarquer que la structuration des miroirs est réalisée avant recuit, car une fois recuites, les couches de nitrure ne seront presque plus gravées par le BHF.



Le wafer est ensuite monté à l'aide d'une couche de graisse thermique sur un wafer support, cela pour permettre de le charger dans un bâti de gravure ionique réactive profonde (DRIE : Deep Reactive Ion Etching) du silicium. Cette précaution a été jugée nécessaire car, à l'intérieur du bâti de gravure DRIE, le wafer est maintenu en place par des clamps exerçant une pression qui risque de briser les wafers trop fins (300-400 μm d'épaisseur).

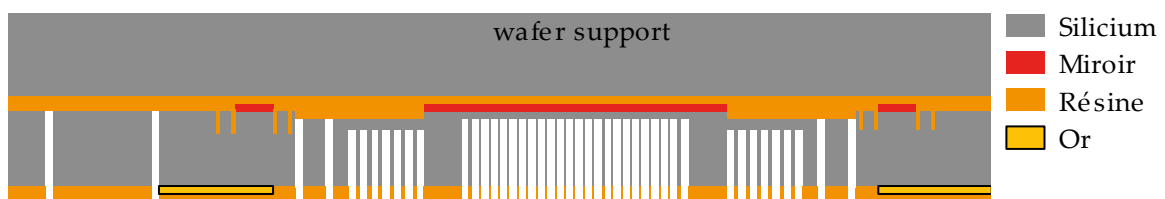
La face avant du wafer est ensuite gravée, sur $6.3\ \mu\text{m}$ de profondeur, soit par DRIE avec un procédé de type Bosch (cf. partie 2.3.2.3 p38), soit par gravure ionique réactive (RIE) avec un plasma SF_6+O_2 (ceci permet de s'affranchir du wafer support). Cette étape nous permet de définir les croix d'alignement, et d'abaisser le niveau des électrodes d'actionnement. Elle est nécessaire, car au niveau des miroirs, les gaps d'air physiques minima ne seront que de $500\ \text{nm}$. Comme indiqué dans la partie précédente, ceci nous permet ainsi d'augmenter la course d'actionnement et d'éviter que l'on atteigne la tension de Pull-in.



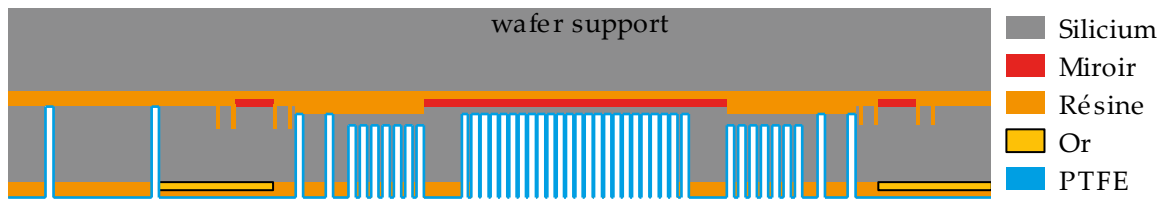
Une seconde gravure DRIE (facultative) a été prévue pour faire des tranchées de $30\ \mu\text{m}$ de profondeur. Situées en face avant et à la périphérie de la structure, ces tranchées serviront à faciliter la compression et à absorber l'excédent du joint de scellement adhésif en Benzocyclobutène (BCB) entre les wafers. Ces tranchées devraient aussi augmenter la résistance mécanique au cisaillement du joint BCB pendant l'étape de découpe à la scie diamant.



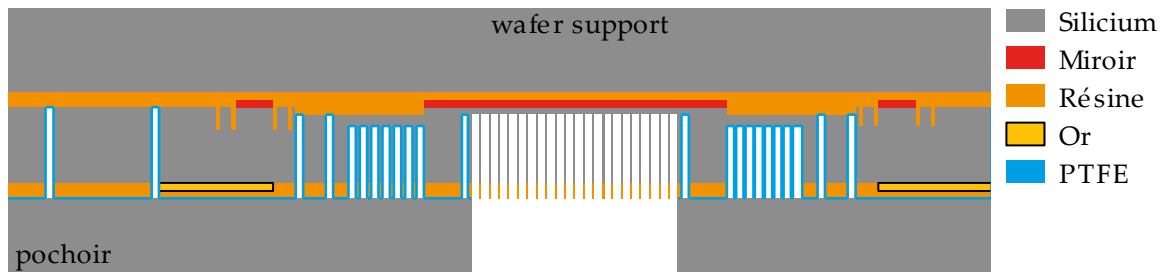
Des contacts électriques Au/Ti sont ensuite déposés, et délimités par lift-off sur la face arrière. La résine en face avant sert à protéger les miroirs contre les rayures et poussières.



Le wafer est ensuite gravé de part en part au niveau des ressorts par DRIE. Les zones à graver étant de tailles très différentes, il a fallu utiliser des motifs temporaires dans les zones de grande surface (miroirs, électrodes) pour rendre leurs vitesses de gravure plus lentes qu'au niveau des ressorts. Les tests utilisés pour mettre au point cette technique seront détaillés dans le chapitre 5 (p139). A la fin de cette gravure, la structure mobile supportant le miroir est en principe complètement libérée. Les motifs temporaires sont toujours présents, et seront éliminés à la prochaine étape.



La prochaine étape consiste à graver de manière isotrope (par XeF_2) la fine couche de silicium restant en dessous des miroirs. Cependant, avant de faire la gravure, il faut protéger les ressorts, le dessous des électrodes, et le cadre sur lequel est ancrée la membrane. Pour cela, nous avons décidé d'utiliser le polymère de passivation fluorocarboné déposé dans le bâti de DRIE (appelé ici "PTFE"). En effet, contrairement à une résine liquide, l'étape de passivation du procédé de gravure DRIE permet d'obtenir un dépôt conforme de PTFE, même sur les flancs des gravures profondes.



Le PTFE situé uniquement sous les miroirs est ensuite gravé par plasma O_2 , en protégeant le reste du wafer avec un pochoir aligné mécaniquement. Si nécessaire, un traitement plasma supplémentaire et plus agressif peut être effectué pour nettoyer le fond des motifs de remplissage, car le XeF_2 est très sélectif et sera donc sensible à la moindre contamination.



Le wafer est décollé du wafer support. La fine couche de silicium et les motifs temporaires sous les miroirs sont ensuite gravés chimiquement en atmosphère gazeuse par XeF_2 . Cette technique de gravure du silicium très sélective par rapport à la silice permet un arrêt strict de la gravure sur la membrane.



Le wafer est ensuite nettoyé par plasma O_2 pour retirer le polymère de passivation, puis à l'aide d'un remover pour retirer la résine. Après nettoyage, le wafer est prêt pour l'assemblage. Ci dessus, sur la vue en coupe, une ouverture de grande taille sur le côté de la structure est visible à gauche de l'électrode. Une autre est également présente de l'autre côté

de la structure (non représentée). Ces ouvertures ont été prévues pour limiter le nombre de découpes à la scie diamant réalisées en fin de procédé. Elles permettent aussi d'éviter d'endommager lors de l'assemblage les électrodes situées sur le wafer en borosilicate.

3.3.2 Miroir fixe

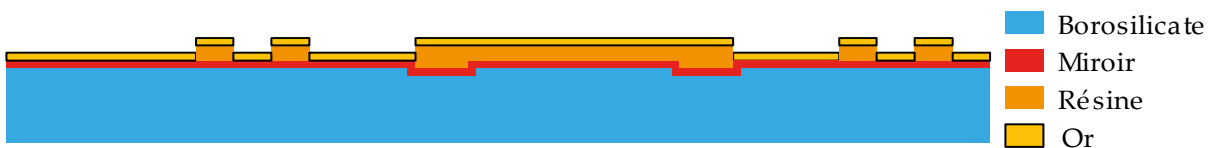
Les étapes de fabrication des miroirs fixes sur le wafer de borosilicate sont les suivantes :



Une gravure RIE de 3-4 μm est réalisée sur une zone située juste au dessus du point d'ancrage de la membrane sur le cadre rigide en silicium. Cette gravure augmente l'espace entre la partie mobile et la partie fixe, et donc permet de limiter les risques de contact entre les miroirs dans le cas où la structure du miroir mobile ne reste pas plane après libération. De cette manière, seules les surfaces constituant la pupille auront un gap minimum de 500 nm lors de l'actionnement.



Ensuite le wafer est nettoyé et envoyé à SAGEM REOSC pour le dépôt pleine plaque du miroir multicouche ZnS/YF₃.



Les électrodes d'actionnement sont ensuite déposées par lift-off.



Puis des cales de 4.3 μm d'épaisseur sont déposées : ce sont elles qui déterminent le gap initial entre les miroirs. Pour fabriquer les cales plusieurs solutions s'offrent à nous :

- Soit elles sont réalisées par le dépôt par pulvérisation d'une couche épaisse d'un matériau dur (nickel ou chrome). Cette méthode nécessite des temps de dépôt élevés et risque de ne pas être faisable.
- Soit nous n'utilisons pas de cales métalliques, mais une cale en polymère dont la rigidité a été augmentée par ajout de billes de silice de diamètre contrôlé. Cette méthode est plus rapide mais ne sépare plus nettement les fonctions de scellement et d'ajustement du gap. Cette méthode, à notre connaissance, n'a jamais été testée.
- Soit les cales sont fabriquées par dépôt électrolytique, avec éventuellement une planarisation mécano-chimique si le dépôt électrolytique n'est pas suffisamment précis.



Le wafer est ensuite nettoyé, et le joint de scellement en BCB est formé par étalement à la tournette puis insolation UV et développement. Pour cette étape, si l'étalement à la tournette du BCB ne nous donne pas un joint étanche en fin d'assemblage (nécessaire pour la découpe à la scie diamantée, car elle est refroidie par eau), nous pourrions utiliser des résines sous forme de films secs (cf. partie 6.2 p169).



Si l'on utilise des billes de silice mélangées au BCB, on n'aura pas besoin de déposer des cales métalliques : un simple spin-coating / insolation / développement du BCB suffira.

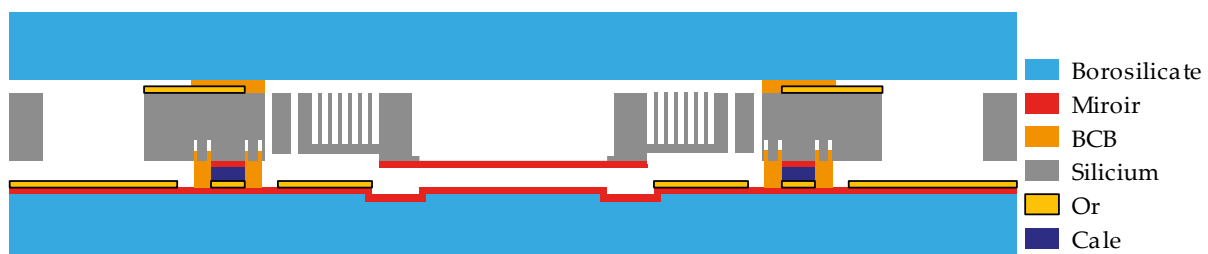
3.3.3 Assemblage

Pour le second wafer en borosilicate d'encapsulation, il y a une seule étape : un enrésinement avec structuration du joint de scellement en BCB (non représenté ici).

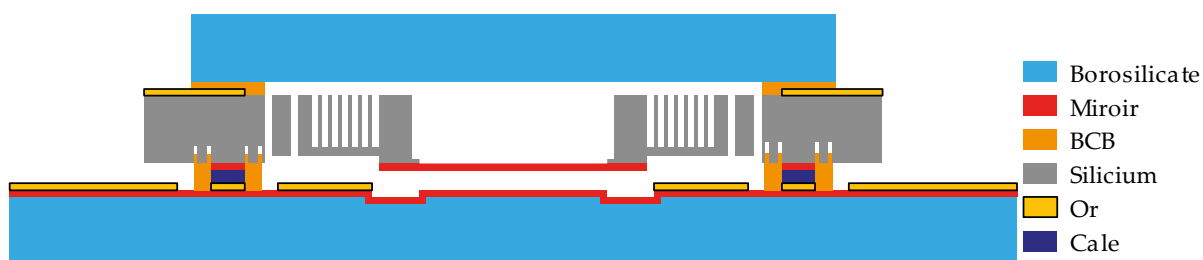


Enfin, les trois wafers sont assemblés :

Le wafer en borosilicate d'encapsulation est d'abord aligné avec la face arrière du wafer en silicium. Le BCB non recuit ne sera pas complètement sec et adhèrera légèrement au wafer en silicium.



Puis le second wafer en borosilicate est aligné sur le wafer en silicium. Les trois wafers sont ensuite soudés à l'aide d'une machine de wafer bonding.



La dernière étape consiste à découper à la scie diamant les trois wafers. Les coupes ne seront pas toutes faites sur la même face de l'assemblage et n'auront pas toutes les mêmes profondeurs. Cela nous permettra d'obtenir une puce avec plusieurs étages et possédant des connexions sur une seule face.

Cette étape de découpe n'a pas pu faire l'objet de tests technologiques : son succès est donc loin d'être acquis. En cas d'échec, des techniques alternatives de découpe (laser, ultrasons,...) devront être considérées, ou d'autres stratégies de prises de contact devront être développées, comme par exemple des techniques exploitant des vias de connexion.

3.3.4 Conclusion

Certes le procédé de fabrication est assez long, et nécessite un total de douze masques de photolithographie (cf. figure 3.33). Cependant, chaque wafer devant n'utiliser qu'au maximum 5 niveaux, cela devient un nombre raisonnable d'étapes de fabrication. Les plus gros problèmes proviendront des techniques de fabrication utilisées sur le wafer en silicium, qui doivent être mise au point et qui ont fait l'objet de la majeure partie de cette thèse.

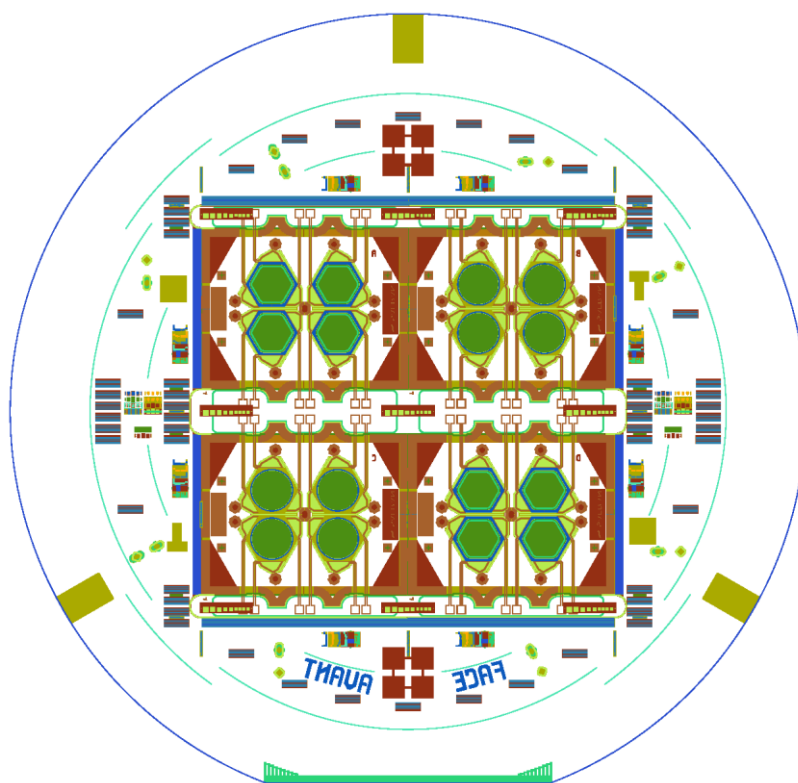


Figure 3.33 : Vue d'ensemble montrant les douze niveaux de masques de photolithographie dessinés en fin de thèse.

3.4 Conclusion sur la conception

Dans ce chapitre, nous avons introduit la formule (3.8) (p52) donnant la transmittance des filtres Fabry Péro. Cette formule est plus générale que la formule simplifiée d'un Fabry Péro idéal symétrique, car elle prend en compte le déphasage et la différence de réflectance des miroirs. Nous l'avons utilisée pour évaluer les performances du filtre Fabry Péro utilisant les miroirs multicouches développés sous TFCALC.

Le cahier des charges que nous avons eu à satisfaire est le suivant :

- faible absorbance pour obtenir une transmittance maximum d'au moins 80 % ;
- réflectance effective égale à 55 % (entre 550 et 850 nm) ;
- largeur à mi-hauteur (FWHM) des pics de transmittance inférieure à 55 nm ;
- intervalle spectral libre supérieur à 180 nm ;
- planéité des miroirs meilleure que 30 nm pic à pic ;
- positionnement du miroir mobile ajustable à 10 nm près ;
- chaque filtre doit occuper plus de 50 % de la surface de la lentille ;
- ordre d'interférence $m = 3$;
- variation du gap d'air (optique) 825-1275 nm.

Pour pouvoir atteindre une réflectance effective de 55 %, nous avons dû dimensionner deux miroirs utilisant chacun des combinaisons de matériaux différents (cf. tableau 3.17).

miroir	réflectance	épaisseur	Nbr. couches	matériaux	dépôt
fixe	58.9	894.4	12	ZnS/YF ₃	SAGEM REOSC
mobile	50.2	1393.52	12	Si ₃ N ₄ /SiO ₂	IEF par PECVD

Tableau 3.17 : Performances des miroirs développés.

Les performances optiques attendues ont été calculées à l'aide de la nouvelle formule de transmittance (3.8) (p52), elles sont listées dans le tableau 3.18.

ordre $m = 3$ ($m' = 1$)	finesse	ISL	FWHM	T_{\max}	T_{\min}
moyen	5.2±0.1	214.4±29.2	44.1±4.6	94.1±0.7	8.2±0.4
min	3.9	185.2	30.5	-	-
max	8.9	271.7	49.2	-	-

Tableau 3.18 : Performances attendues pour les filtres Fabry Péro.

Les optimisations ont pris en compte la réflectance et le déphasage des multicouches. Le dimensionnement final aura un déphasage continu sur toute la gamme de longueur d'onde, ce qui lui donnera un comportement proche d'un Fabry Péro simplifié. Cependant, le déphasage moyen des deux miroirs diminue la valeur du gap d'air optique de 325 nm, et donc, le gap d'air physique entre les miroirs sera de 500-950 nm.

Les contrastes d'indice des deux combinaisons de matériaux étant différents, nous avons pu obtenir une réflectance maximale d'environ 50 % sur le miroir mobile, et d'environ 80 % sur le miroir fixe. Mais pour limiter la baisse de la transmittance du filtre Fabry Pérot, il a fallu diminuer les écarts en réflectance des deux miroirs : nous utiliserons un miroir fixe ayant une réflectance moyenne de 58.9 % au lieu de 80 %.

Avec les miroirs actuels, nous répondons à toutes les exigences du cahier des charges, mais en pratique les performances de filtrage seront loin d'être optimales, car nous n'avons pas pris en compte l'élargissement des pics de transmittance lorsque les miroirs ne sont pas plats, et lorsque le parallélisme est mal contrôlé. Pour que les propriétés des filtres ne se dégradent pas trop, il faudra dans l'avenir augmenter la réflectance du miroir mobile. A cet effet, quatre solutions seront envisageables :

- modifier les recettes de dépôt PECVD pour obtenir un contraste d'indice plus élevé ;
- utiliser les mêmes matériaux pour les deux miroirs ;
- déposer des miroirs mobiles différents pour chaque filtre de la matrice en utilisant des pochoirs ;
- utiliser la première conception de multicouche avec des filtres passe bande pour sélectionner l'ordre d'interférence.

D'un point de vue électromécanique, la principale difficulté a été de concevoir une structure en silicium qui se déforme peu durant l'actionnement. Toutes les limites du procédé de fabrication n'étant pas connues, cette première version en technologie silicium a été conçue pour avoir des marges de fabrication larges. Les propriétés attendues pour des déplacements de 4 μm et des wafers d'épaisseur comprise entre 350 et 400 μm sont listées dans le tableau 3.19.

gap électrode (μm)	12-8
gap d'air physique miroirs (μm)	4.5-0.5
gap d'air utile pour l'accordabilité (μm)	0.50 -0.95
gap d'air pour compensation des accélérations (μm)	0.25
gap d'air pour ajustement parallélisme (μm)	3.3
déformée cadre (4 μm déplacement) (nm)	11.9-13.1
déformée bord cadre (4 μm déplacement) (nm)	8.8-9.0
déformée électrodes (4 μm déplacement) (nm)	11.9-13.1
Fres (mode 1 à 6) (kHz)	2.131-4.671
tension actionnement max (V)	122-143.9
couverture lentilles (%)	69-75

Tableau 3.19 : Propriétés électromécaniques attendues pour les miroirs mobiles.

La structure la plus compacte que l'on ait pu dessiner est de forme triangulaire avec trois ressorts gravés par DRIE dans l'épaisseur du wafer. Pour obtenir des ressorts de raideur identiques, nous avons considéré un wafer en silicium orienté (111) ayant une épaisseur comprise entre 350 et 370 μm .

Bien que du point de vue optique la course nécessaire soit seulement de 450 nm, la structure a été dessinée pour une course d'actionnement beaucoup plus grande, de 4 μm , qui inclut en outre : la course d'accordabilité du filtre, une précontrainte des ressorts pour compenser les accélérations parasites, et une marge pour les défauts d'assemblage. Une telle course peut aussi servir pour des filtres Fabry Péroต์ fonctionnant à des longueurs d'onde plus élevées.

La structure a été dessinée pour maintenir les déformations du cadre et des électrodes à moins de 13 nm pour 4 μm de déplacement, quelle que soit l'épaisseur du wafer. De plus, la structure est suffisamment compacte pour permettre une couverture de 69 à 75 % de la surface des lentilles. La conception proposée est donc compatible avec les exigences du cahier des charges.

Les tensions d'actionnement seront élevées ($< 122\text{ V}$ ou $< 144\text{ V}$ selon l'épaisseur du wafer) mais elles pourront être revues à la baisse si l'assemblage des wafers ne pose pas de problèmes. Du point de vue du comportement dynamique de la structure, il n'est pas possible d'obtenir une géométrie avec des fréquences de résonance du mode fondamental supérieures à 10 kHz. Cependant l'important amortissement visqueux escompté, associé à la possibilité d'un asservissement du gap, devrait permettre de surmonter cette limitation.

Du point de vue de la fabrication, nous avons proposé un assemblage de 3 wafers :

- un wafer en borosilicate supportant le miroir fixe ;
- un wafer en silicium intégrant le miroir mobile, lequel sera sous forme de membrane ;
- un second wafer en borosilicate pour l'encapsulation des filtres.

Le procédé de fabrication est assez long, et nécessite un total de douze masques de photolithographie. Cependant, chaque wafer aura moins de 5 niveaux de masque. Ainsi, les risques liés au procédé de fabrication seront minimisés. La fabrication sur le wafer en silicium posera le plus de problèmes et a fait l'objet du plus grand nombre de tests technologiques.

Les étapes de fabrication critiques qu'il a fallu mettre au point sont :

- le contrôle des contraintes résiduelles des couches PECVD par recuit ;
- la fabrication des miroirs sous forme de membranes en utilisant DRIE +XeF₂ ;
- une protection simple à structurer contre la gravure par XeF₂ :
 - polymère de passivation déposé par DRIE et structuration à l'aide d'un shadow mask aligné mécaniquement,
 - ou utilisation de films de résine secs (non testé) ;
- la gravure des motifs de dimensions très différentes par DRIE :
 - en une seule étape avec des motifs de remplissage,
 - en plusieurs étapes avec des films de résine secs (non testé) ;
- l'assemblage de plusieurs wafers avec espacement contrôlé (non testé).

La plupart de ces développements technologiques ont pu être mis au point durant la thèse, ils seront détaillés dans les chapitres qui suivent. En combinant toutes ces techniques de fabrication, on sera en mesure de réaliser des structures très complexes.

Chapitre 4

Fabrication et caractérisation des miroirs diélectriques

La fabrication de miroirs de réflectance contrôlée, ayant une faible rugosité et une planéité élevée, est un problème récurrent dans la réalisation des MOEMS [Nee 2000]. Les filtres Fabry Pérot à réaliser doivent intégrer des miroirs de diamètre supérieur à 5 mm, et ayant une planéité pic à pic inférieure à 30 nm sur toute leur surface. L'une des difficultés majeures est de pouvoir obtenir cette planéité pour chacun des quatre miroirs composant la matrice. De plus, la réflectance des miroirs doit être constante dans une large gamme de longueurs d'onde et être homogène sur toute sa surface.

Pour atteindre cet objectif, un procédé de fabrication de membranes multicouches diélectriques d'environ 1 μm d'épaisseur présentant une contrainte résiduelle en tension a été développé. Les membranes sont encastrées dans un cadre en silicium rigide pour conserver au mieux cet état de contrainte. L'utilisation d'une membrane en tension devrait en effet fournir deux avantages :

- un allègement de la structure et ainsi une diminution de son inertie ;
- la possibilité d'utiliser les filtres en transmission dans le visible, tout en bénéficiant des propriétés mécaniques du silicium.

Dans les sous-chapitres qui suivent, je décrirai en premier les caractéristiques et la stabilité des dépôts PECVD standards de silice et de nitrure de silicium réalisables à l'IEF. Le second sous-chapitre sera une courte bibliographie montrant les différentes méthodes de contrôle des contraintes résiduelles disponibles pour des couches déposées par PECVD. Ensuite, je parlerai des recuits réalisés sur des couches individuelles. Enfin, j'exposerai les résultats des recuits sur les miroirs multicouches, ainsi que la libération et caractérisation des miroirs sous forme de membrane.

4.1 Choix des matériaux diélectriques et propriétés des films dans les conditions "standards" de dépôt

A notre connaissance, les miroirs diélectriques sont habituellement déposés par :

- évaporation réactive avec un faisceau d'électrons, assistée ou non par un faisceau d'ions ;
- pulvérisation réactive par faisceaux d'ions ;
- oxydation plasma de films déposés par pulvérisation cathodique ;
- épitaxie à jets moléculaires.

Ces techniques permettent de déposer une large gamme de matériaux avec des épaisseurs bien maîtrisées pour une large plage de longueurs d'onde. Mais elles sont cependant peu fréquentes dans les centrales de micro/nanotechnologies, et le contrôle de la contrainte résiduelle est difficile, voire impossible avec ces méthodes de dépôt.

Pour la fabrication des miroirs diélectriques nous avons choisi d'utiliser des films de silice et de nitrure de silicium élaborés par dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition : PECVD*). La PECVD est une méthode de dépôt de couches minces couramment utilisée en microfabrication. Les espèces contenant les éléments à déposer sont introduits dans la chambre de dépôt sous forme de gaz, et décomposés en espèces réactives à l'aide d'un plasma. Pour obtenir des couches de bonne qualité, l'échantillon est en général chauffé à quelques centaines de degrés. Ainsi, comparé à la CVD, la PECVD offre l'avantage de réaliser des dépôts à basse température (60-300 °C), alors que sans plasma, le même type de réaction chimique ne peut avoir lieu qu'en chauffant le substrat à 800-1000 °C.

Comparée aux méthodes de dépôt de miroirs multicouches couramment utilisées en optique, les films PECVD présentent cependant un contraste d'indice optique relativement faible ($n_{\text{SiO}_2} \sim 1.5$, $n_{\text{Si}_3\text{N}_4} \sim 2$), mais cette technique de dépôt offre la possibilité d'ajuster la contrainte résiduelle, soit en faisant varier la fréquence du plasma, soit par recuit.

4.1.1 Analyse des dépôts standards

Le contrôle de la vitesse de dépôt et de l'indice des couches étant particulièrement critique pour la fabrication des miroirs diélectriques, il est intéressant d'évaluer la reproductibilité des propriétés des films réalisés dans les conditions de dépôt dites "standards" de l'IEF.

Les films ont été déposés dans un réacteur PECVD multifréquence de la société STS. Ce système permet des dépôts avec un plasma basse fréquence (380 kHz), haute fréquence (13.56 MHz), ou en alternant ces deux fréquences. Notre bâti de dépôt PECVD ne permet pas de contrôler in situ l'épaisseur déposée. C'est pourquoi des tests ont été effectués pour

évaluer la reproductibilité des vitesses de dépôt, de l'indice de réfraction, et de la contrainte résiduelle des films. Les tests ont été réalisés sur deux années et sur cinq séries d'échantillons. Le nombre total d'échantillons est faible, car l'objectif était d'avoir un ordre de grandeur des variations, afin de savoir s'il est nécessaire ou non d'étalonner les couches avant le dépôt de chaque miroir.

Dans les parties qui suivent, je présenterai les procédures utilisées pour le dépôt de ces échantillons, puis j'exposerai les résultats des caractérisations.

4.1.1.1 Procédure de dépôt

a) *Recette de dépôt*

Les paramètres « standards » de dépôt des films de silice et de nitrure de silicium basse fréquence (LFSIO et LFSIN) et haute fréquence (HFSIO et HFSIN) qui ont été utilisés pour ces dépôts sont rassemblés dans le tableau 4.1.

Couche	LFSIN	HFSIN	LFSIO	HFSIO
N ₂ O (sccm)	0	0	1420	1420
SiH ₄ (2 % dans N ₂) (sccm)	2000	2000	400	400
NH ₃ (sccm)	20	55	0	0
Pression (mTorr)	550	900	550	800
Température (°C)	300	300	300	300
Fréquence	380 kHz	13.56 MHz	380 kHz	13.56 MHz
Puissance (W)	60	20	60	20

Tableau 4.1 : Paramètres de dépôt PECVD utilisés.

b) *Nettoyage de la chambre PECVD et des wafers*

Pour nous assurer une certaine reproductibilité, nous avons réalisé, avant chaque série complète de dépôts de plusieurs couches, un seul et unique nettoyage par plasma (CF₄+O₂) de la chambre de dépôt PECVD, suivie d'un dépôt de 15 minutes de LFSIO pour passiver les parois de la chambre. En effet, d'après des travaux précédemment réalisés à l'IEF par Olivier Garel [Garel 2009], les vitesses de dépôt, la contrainte mécanique résiduelle, et dans une moindre mesure l'indice optique évoluent en fonction du temps d'utilisation du bâti et du type de nettoyage utilisé. Effectivement, les nettoyages de la chambre peuvent être réalisés soit à l'aide d'un plasma, soit mécaniquement par grattage. Le nettoyage mécanique est plus efficace que le nettoyage plasma, mais pour des raisons pratiques, il n'est réalisé qu'au-delà d'une certaine épaisseur cumulée de dépôts. C'est pourquoi un nettoyage par plasma a été privilégié pour la plupart des échantillons.

Pendant la gravure et la passivation de la chambre PECVD, et avant dépôt des couches, les wafers ont été nettoyés à l'aide de la procédure suivante :

- mélange piranha (H₂O₂ (30 %) : H₂SO₄ (96 %) 1 : 2) pour retirer les contaminations organiques ;

- rinçage à l'eau désionisée (EDI) pendant 5 minutes ;
- gravure de la couche d'oxyde natif par acide fluorhydrique tamponné (BHF : Buffered Hydrofluoric acid) pendant une minute (cette étape n'est réalisée que quelques minutes avant le dépôt PECVD pour minimiser la présence d'oxyde natif à la surface du wafer) ;
- second rinçage à l'eau désionisée (EDI) pendant 5 minutes.

Enfin, pour obtenir le maximum de précision sur la mesure par ellipsométrie de l'épaisseur et de l'indice (cf. annexe B p195), des épaisseurs voisines de 430 nm pour le nitrure de silicium et de 278 nm pour la silice ont été déposées par PECVD sur les wafers.

c) Dépôt des couches et caractérisation

La date et le type de substrat utilisé sont listés dans le tableau 4.2. Tous les dépôts ont été réalisés sur des wafers de silicium d'orientation (100) polis double face.

Série	1	2	3	4	5
Date dépôt	01/10/2010	27/06/2011	29/06/2011	28/03/2012	21/06/2012
Diamètre wafer (pouces)	2	4	4	2	2

Tableau 4.2 : Dates de dépôt et diamètre des wafers utilisés sur les différentes séries utilisées pour observer l'évolution sur le long terme des propriétés des couches PECVD.

Certaines différences entre les échantillons sont à noter :

- Les séries 2 et 3 ont été déposées sur des wafers de diamètre plus élevé pour mesurer les contraintes résiduelles des couches, les résultats de ces mesures seront détaillés plus loin dans la partie 4.3 (p114).
- La majorité des dépôts ont été effectués après le nettoyage par plasma de la chambre PECVD, seule la série N°2 a été déposée après un nettoyage mécanique + plasma de la chambre.

Ensuite, la caractérisation des couches a consisté à :

- mesurer l'épaisseur et l'indice des films par ellipsométrie monochrome (Ellipsomètre PLASMOS SD2300) avec un angle incident de 70°, une longueur d'onde de 632.8 nm et en prenant pour l'indice du substrat de silicium $n_{Si} = 3.8717 - i0.0158$;
- mesurer la contrainte résiduelle des échantillons de la série 2 et 3 par balayage laser (FSM 500 TC de la société Frontier Semiconductor) (cf. annexe C p199).

4.1.1.2 **Résultats**

a) Reproductibilité de la vitesse de dépôt

La figure 4.1 montre la variation des vitesses de dépôt et les écarts relatifs à la moyenne pour les 4 types de films, selon la série de dépôt.

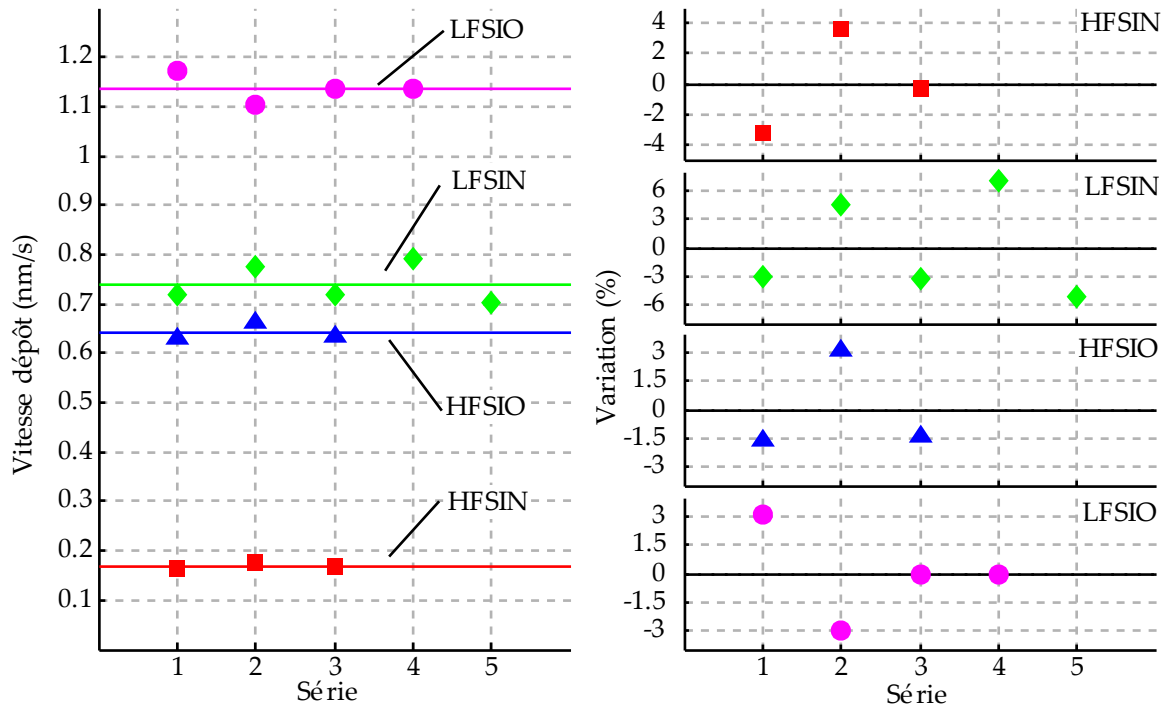


Figure 4.1 : A gauche, évolution des vitesses de dépôt selon la série du dépôt. A droite, évolution des écarts à la moyenne des vitesses de dépôt selon la série du dépôt.

Couche	HFSIN	LFSIN	HFSIO	LFSIO
Vitesse moyenne (nm.s ⁻¹)	0.1682	0.7411	0.6419	1.1378

Tableau 4.3 : Vitesse moyenne de dépôt.

Le tableau 4.3 permet de remarquer que la vitesse de dépôt des films basse fréquence est en général 2 fois plus élevée que pour les films déposés à haute fréquence. La dispersion des vitesses de dépôt est assez faible avec $\pm 3\%$ pour les dépôts HFSIN, LFSIO et HFSIO. Cependant, pour une raison non identifiée, les films de LFSIN ont une dispersion des vitesses de dépôt de $\pm 6\%$ soit une valeur 2 fois plus élevée que pour les autres films.

b) Reproductibilité de l'indice de réfraction

Le même type d'analyse a été mené pour l'indice optique. La figure 4.2 montre les évolutions des indices de réfraction des films et de leurs écarts par rapport à la moyenne. D'une manière générale les indices de nos dépôts PECVD (cf. tableau 4.4) sont plus élevés que dans la littérature, où les indices valent typiquement 1.94-1.98 pour le nitrure de silicium, et 1.46-1.465 pour la silice. Pour le nitrure de silicium ceci pourrait traduire une densité plus élevée, un excès de silicium ou une contamination plus faible en oxygène. Pour la silice le plus

probable est une incorporation d'azote dans les films provenant des deux gaz utilisés dans la recette de dépôt (2 % SiH₄ dilué dans N₂, et N₂O).

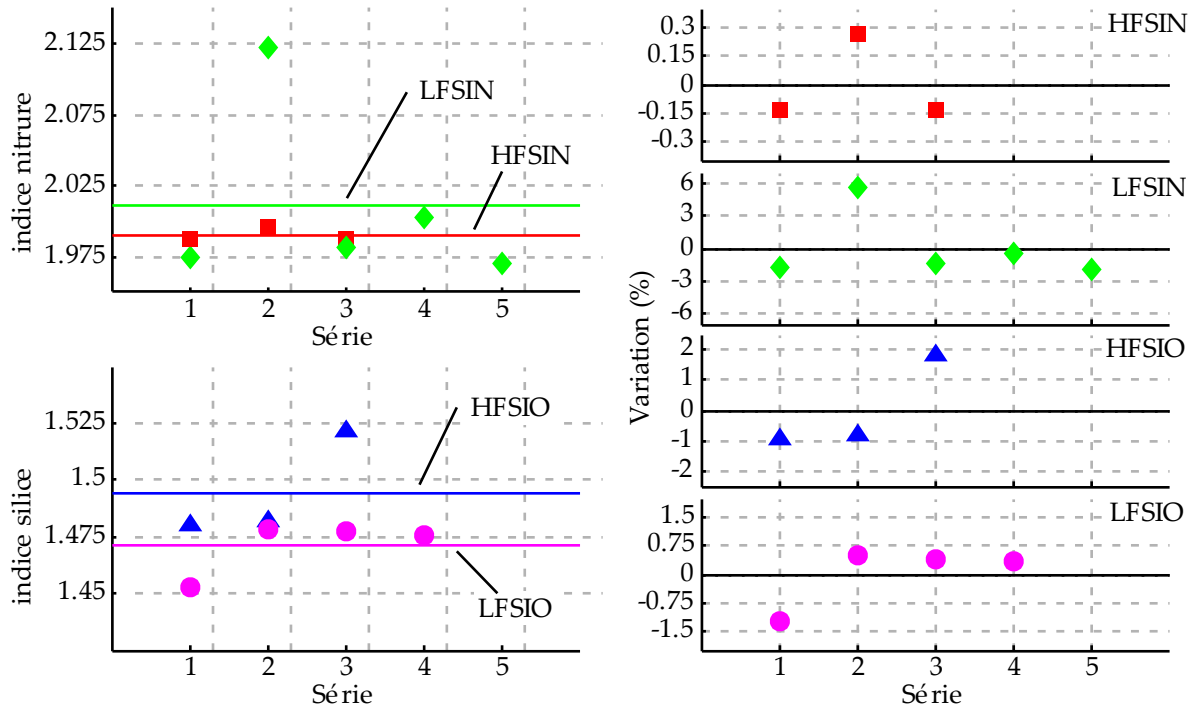


Figure 4.2 : A gauche, évolution des indices de réfraction selon la série du dépôt. A droite, évolution des écarts à la moyenne des indices de réfraction selon la série du dépôt.

Couches	HFSIN	LFSIN	HFSIO	LFSIO
Indice moyen	1.9907	2.0106	1.4943	1.4710

Tableau 4.4 : Indice moyen.

Les indices des films de nitruure de silicium de la seconde série sont clairement différents de ceux des autres séries. Ceci doit provenir du nettoyage mécanique de la chambre qui a été réalisé juste avant le dépôt de la seconde série d'échantillons. Si l'on met à part cette série, la dispersion des indices est inférieure à ± 2 %, donc plutôt faible.

c) Contraintes résiduelles

La contrainte résiduelle de deux échantillons (la série 2 et 3) a été mesurée par la méthode du rayon de courbure (cf. annexe C p199), les résultats sont listés dans le tableau 4.5 et la figure 4.3.

Couche	HFSIN	LFSIN	HFSIO	LFSIO
Contrainte (MPa)	+466 \pm 5	-864 \pm 12	-301 \pm 9	-383 \pm 5

Tableau 4.5 : Contraintes dans les films de silice et de nitruure de silicium pour des conditions standards de dépôt dans le bâti PECVD multifréquence de l'IEF.

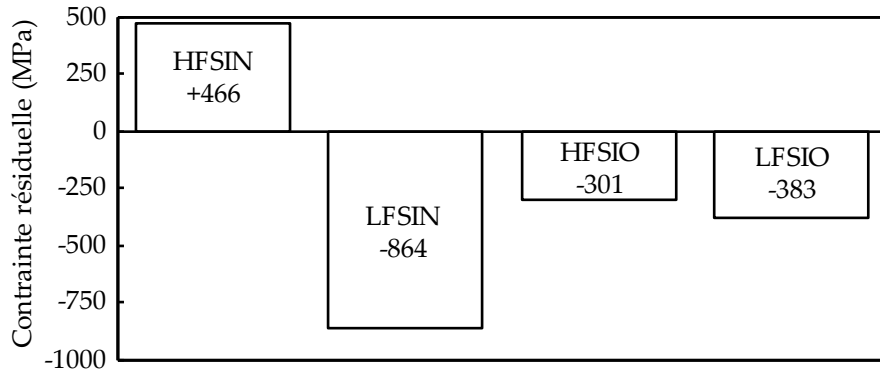


Figure 4.3 : Contrainte résiduelle moyenne après dépôt pour les échantillons des séries 2 et 3.

Seuls les films de nitrure de silicium déposés à haute fréquence sont contraints en tension (contrainte positive). Les autres films sont fortement contraints en compression. La différence de contrainte résiduelle provient, d'une part, du bombardement ionique du film plus élevé en basse fréquence, et d'autre part, de la présence de liaisons avec de l'hydrogène en concentration plus ou moins importante. Une forte incorporation d'hydrogène est caractéristique des dépôts PECVD [Ay 2004] et provient des gaz utilisés lors du dépôt (SiH_4 et NH_3). L'évolution des liaisons de l'hydrogène en fonction des contraintes résiduelles sera détaillée dans la partie suivante.

4.1.2 Conclusion sur les dépôts standards

Le tableau 4.6 résume l'ensemble des résultats :

Couche	HFSIN	LFSIN	HFSIO	LFSIO
Vitesse moyenne	0.1682 nm/s	0.7411 nm/s	0.6419 nm/s	1.1378 nm/s
	10.1 nm/min	44.5 nm/min	38.5 nm/min	68.3 nm/min
Indice moyen	1.9907	2.0106	1.4943	1.4710
Contrainte (MPa)	+466 ±5	-864 ±12	-301 ±9	-383 ±5

Tableau 4.6 : Propriétés des films de silice et de nitrures de silicium pour des conditions standards de dépôt dans le bâti PECVD multifréquence de l'IEF.

Il faut retenir que sur le long terme, les indices restent assez constants avec des variations d'environ $\pm 1-2\%$, par contre les vitesses de dépôt varient plus ($\pm 3-6\%$). Cependant, malgré ces variations en apparence faibles, il sera nécessaire d'étalonner à la fois les vitesses de dépôt et la valeur des indices avant de déposer un multicouche, car le multicouche à déposer ne tolère pas une trop grande variation des propriétés optiques des couches.

Au niveau des contraintes résiduelles, il est difficile de tirer une conclusion sur leur reproductibilité, car les mesures citées dans cette partie ont seulement été effectuées sur deux séries déposées à quelques jours d'intervalle.

Cependant, il est utile de préciser qu'au cours de cette thèse, nous avons privilégié le contrôle des contraintes résiduelles sur le contrôle des propriétés optiques. En effet, le contrôle de la réflectance pourra toujours être amélioré par un dimensionnement de multicouche plus robuste, ou en modifiant les recettes de dépôt de manière à obtenir un contraste d'indice plus élevé. Ainsi dans les parties suivantes, après un examen des voies possibles pour contrôler les contraintes mécaniques résiduelles dans les films et dans les multicouches, j'examinerai en détail le contrôle des contraintes résiduelles de films PECVD individuels et sous forme de multicouches.

4.2 Choix de la méthode pour contrôler les contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles des couches PECVD peuvent être ajustées de trois manières :

- par alternance rapide de dépôts à haute et basse fréquence du nitrure de silicium HFSIN et LFSIN (mode fréquence mixte) [Picciotto 2009 ; Tarraf 2004] ;
- par modification des paramètres de dépôt [Ceiler 1995 ; Ong 2006] ;
- par recuit [Danaie 2002 ; Huang 2006 ; Mani 2007 ; Picciotto 2009].

Pour obtenir un multicouche ayant une contrainte moyenne contrôlée, la première méthode consiste à compenser les contraintes résiduelles compressives des couches de LFSIN avec les contraintes résiduelles en tension des couches HFSIN. Des travaux précédents de l'IEF [Garel 2009] ont montré que cette méthode permettait d'élaborer des films avec une faible contrainte en tension. Cependant, la contrainte résiduelle n'est pas reproductible, car elle varie en fonction des couches précédemment déposées dans le bâti ; cette méthode a donc été écartée.

Les deux autres méthodes (modification des paramètres de dépôt, et recuit) utilisent la variation de la composition et de la densité des couches pour faire varier la contrainte résiduelle. Ces deux autres méthodes présentent un ou plusieurs inconvénients décrits ci-dessous.

4.2.1 Contrôle des contraintes par modification des recettes de dépôt

Le contrôle des contraintes résiduelles par ajustement des paramètres de dépôt a l'avantage de ne pas nécessiter de traitements supplémentaires, et permet de déposer des couches à des températures inférieures à 300 °C. Mais elle présente trois inconvénients : une faible reproductibilité, une gamme limitée de contraintes possibles et un temps de développement important. Ces trois inconvénients sont détaillés ci-dessous :

Premier inconvénient, la faible reproductibilité :

Un ajustement permanent des paramètres de dépôt serait nécessaire pour obtenir la contrainte résiduelle et les indices désirés. En effet, comme indiqué précédemment, les dépôts PECVD évoluent au cours du temps d'utilisation du bâti, car les propriétés du plasma utilisé dépendent fortement de l'état de la chambre dans laquelle il est confiné. Habituellement, un nettoyage par plasma, utilisant un mélange d'O₂ et de CF₄, permet de minimiser ces variations. Néanmoins, même avec des nettoyages plasma fréquents (tous les 3-6 µm de dépôts cumulés), il est difficile d'obtenir les mêmes couches sur de longues périodes d'utilisation du bâti (cf. partie 4.4 p119). D'autre part, le nettoyage plasma n'est pas aussi efficace qu'un nettoyage mécanique et donc, au-delà d'une certaine durée d'utilisation, il est nécessaire d'ouvrir la chambre pour en faire un nettoyage plus approfondi qui, nous l'avons vu précédemment, dégrade fortement la reproductibilité.

Second inconvénient, la limitation des contraintes résiduelles atteignables :

De manière générale [Picciotto 2009 ; Tarraf 2004], le dépôt de nitrure de silicium avec un plasma haute fréquence est la seule couche PECVD qui soit en tension. Avec le bâti de dépôt PECVD utilisé, tous les autres dépôts sont en compression, quels que soient les réglages de puissance, flux, pression et température. Or dans notre cas, pour fabriquer le miroir diélectrique multicouche, les contraintes en compression de la silice doivent être compensées par les couches de nitrure. La valeur de la contrainte totale moyenne σ_{tot} d'un multicouche peut être approximée à l'aide de la formule (4.1), avec l'indice i désignant la couche i , σ_i la contrainte résiduelle de la couche i , et t_i l'épaisseur de la couche i :

$$\sigma_{tot} = \frac{\sum_i \sigma_i t_i}{\sum_i t_i} \quad (4.1)$$

Or dans notre cas, le premier dimensionnement de multicouche (cf. tableau 4.7) nécessite une épaisseur de silice presque deux fois supérieure à celle du nitrure de silicium (~333nm de Si₃N₄, ~563.5 nm de SiO₂). Cela signifie qu'il faut avoir des couches HFSIN avec, en valeur absolue, des contraintes résiduelles en tension deux fois plus élevées que celles des couches HFSIO (la contrainte en compression la plus faible), chose impossible à obtenir avec les contraintes résiduelles des films standards (cf. tableau 4.6 partie 4.1.2 p110).

SiO₂ (L) / Si₃N₄ (H) : épaisseur totale 896.87 nm, 8 couches

Silicium / H 67.45 / L 117.63 / H 82.64 / L 114.66 / H 132.03 / L 205.77 / H 51.21 / L 125.48 / Air

Tableau 4.7 : Epaisseurs en nanomètres des couches déposées après le premier dimensionnement du miroir. Avec "H" pour désigner la couche d'indice élevée et "L" pour désigner la couche d'indice faible.

L'idéal serait de réduire les contraintes en compression de la silice, mais peu d'études ont été faites dans ce but sur ce type de couches. Les quelques publications traitant du sujet [Ceiler 1995 ; Tarraf 2004], indiquent que le flux de gaz et les fréquences utilisées lors du dépôt (HF ou LF) ont peu d'impact sur la valeur des contraintes résiduelles de la silice. En revanche, les paramètres qui ont le plus d'influence sont : la puissance, la température et la pression de la chambre. Par exemple, dans [Tarraf 2004], la température de dépôt de la silice a été réduite à 60 °C, permettant ainsi d'atteindre une contrainte de -25 MPa. Mais, dans ce cas, toute étape technologique nécessitant une température supérieure à 60 °C suffirait à changer la contrainte obtenue, par exemple lors du recuit d'une résine (115-120 °C) ou lors d'une soudure adhésive de wafers avec du BCB (250 °C).

Troisième inconvénient, une durée de développement importante :

La modification des recettes de dépôt peut fortement allonger le temps de développement. En effet, pour atteindre la valeur de contrainte résiduelle désirée, il peut être nécessaire de modifier un grand nombre de paramètres : abaisser la température de dépôt, modifier la

pression des gaz, alterner des recettes différentes... Toutes ces modifications requièrent de nombreux tests, même en utilisant des plans d'expérience.

Ainsi, la méthode de contrôle des contraintes résiduelles par modification des recettes de dépôt n'est pas attractive : le temps de développement requis, le risque de se retrouver avec des conditions de dépôt contraignantes, et la faible reproductibilité nous ont conduit à éliminer cette méthode.

4.2.2 Contrôle des contraintes par recuits

Les recuits ont été utilisés par plusieurs auteurs pour modifier les contraintes résiduelles de films déposés par PECVD [Huang 2006 ; Mani 2007 ; Picciotto 2009]. Des travaux réalisés à l'IEF ont aussi montré que la contrainte d'un film de $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$ déposé par PECVD pouvait être ajustée dans une large gamme par recuit [Danaie 2002]. Comparativement à la modification des paramètres de dépôt, cette méthode présente potentiellement plusieurs avantages avec, à première vue, assez peu d'inconvénients :

Les recuits ont pour avantage de donner des résultats facilement ajustables (ceci est démontré plus loin), et de plus les couches sont plus résistantes chimiquement et seront donc plus stables dans le temps. L'avantage le plus intéressant est que cette méthode laisse plus de libertés sur les paramètres de dépôt, qui pourront être modifiés, indépendamment de l'ajustement des contraintes résiduelles, pour obtenir des dépôts plus reproductibles et des contrastes d'indices plus élevés.

L'inconvénient majeur de la méthode de contrôle des contraintes par recuit se situe au niveau des températures nécessaires, qui peuvent être assez élevées (600-800 °C). Cependant, remarquons qu'un recuit à haute température est compatible avec le procédé de fabrication de notre MOEMS, car les miroirs sont déposés en premier pour bénéficier d'un wafer propre et d'une surface lisse.

Second inconvénient, les indices et épaisseurs des couches vont nécessairement varier lors du recuit, il a donc été nécessaire d'évaluer leur stabilité.

Nous n'avons pas trouvé dans la littérature d'exemples de recuit de multicouche silice/nitride PECVD ou de membranes multicouches diélectriques incluant un nombre élevé de films, c'est pourquoi une partie importante de la thèse a été consacrée à l'étude et la mise au point de ce procédé. Les tests de recuit de multicouches ont mis en évidence différents problèmes qui ont progressivement été résolus. Les parties suivantes décrivent ces difficultés et les solutions qui ont été trouvées.

4.3 Recuits de couches simples

J'ai mené une étude systématique des variations avec le recuit des contraintes mécaniques dans les films individuels de silice et de nitrure de silicium déposés sur silicium à basse et à haute fréquence. Ces expériences ont permis d'estimer les variations des contraintes résiduelles, des indices et des épaisseurs pendant les recuits.

4.3.1 Procédure expérimentale

Les wafers ont été caractérisés à l'aide de trois méthodes de mesure : ellipsométrie mono-longueur d'onde pour les épaisseurs et indices, spectromètre à transformée de Fourier (FTIR) pour les liaisons chimiques, et balayage laser pour la mesure des contraintes résiduelles.

Les expériences ont été réalisées avec des substrats de faible TTV (Total Thickness Variation). Deux mesures ont été faites sur les wafers avant nettoyage :

L'épaisseur moyenne des wafers a été mesurée en plusieurs points par tomographie optique cohérente dans le domaine proche infrarouge ($\lambda = 1.3 \mu\text{m}$) avec le système MEMSCAN (devenu maintenant le système TMap) de la société Fogale Nanotech.

Le rayon de courbure des wafers a été mesuré avant dépôt à l'aide du système FSM 500 TC de la société Frontier Semiconductor, car les wafers utilisés peuvent présenter des défauts de planéité de quelques microns.

Le nettoyage des wafers a ensuite été réalisé et est identique à celui décrit dans la partie 4.1.1.1 (p105) (piranha/EDI/BHF/EDI).

Le dépôt des couches a été réalisé après préparation de la chambre PECVD : nettoyage plasma et dépôt (sans échantillon) de 15 minutes de LFSIO pour passiver les parois. Les couches sont ensuite déposées sans nettoyage plasma supplémentaire entre chaque dépôt, donc l'ordre des dépôts peut avoir un impact sur les propriétés des couches. L'ordre dans lesquels les dépôts ont été réalisés est indiqué dans le tableau 4.8.

Ordre dépôt	Série 2	Série 3
1	HFSIN	HFSIN
2	HFSIO	LFSIO
3	LFSIN	LFSIN
4	-	HFSIO

Tableau 4.8 : Ordre dans lesquels les dépôts ont été réalisés.

Les échantillons utilisés dans ce sous-chapitre sont ceux qui constituent la série 2 et 3 d'échantillons analysés dans la partie 4.1.1 (p104). Ainsi, il est utile de remarquer que la série 2 a été déposée juste après un nettoyage mécanique, suivi d'un nettoyage par plasma de la chambre PECVD. La série 3 d'échantillons a été déposée quelques jours après la série 2, et

donc ses valeurs sont sans doute plus proches des conditions habituelles d'utilisation de la PECVD.

Les wafers ont ensuite été recuits à une température allant de 300 °C (la température de dépôt) jusqu'à 700 °C. Les paramètres de recuit sous flux d'azote (3000 sccm) ont été programmés de la manière suivante:

- au départ une rampe de 2 °C/minute de T_0 à $T_0 + 50$ °C ;
- stabilisation pendant 1 heure 30 minutes à $T_0 + 50$ °C ;
- sortie du four à $T_0 + 50$ °C.

Les wafers sont sortis du four à la fin de chaque recuit (tous les 50 °C) pour mesurer la contrainte résiduelle par balayage laser, ainsi que l'épaisseur et l'indice des films par ellipsométrie. Tous les 100 °C, une mesure des liaisons chimiques présentes dans les films par spectrométrie Infra Rouge à Transformée de Fourier (FTIR) a été effectuée en mode transmission avec un spectromètre Varian 670 IR équipé d'un système de cartographie PIKE MapIR.

4.3.2 Résultats

4.3.2.1 Contrainte résiduelle

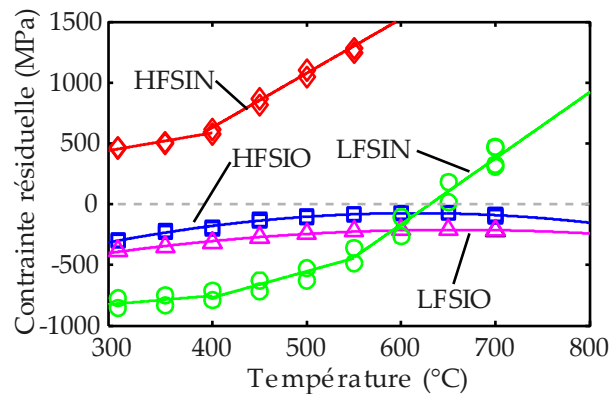


Figure 4.4 : Evolution des contraintes résiduelles des films PECVD de silice et de nitrure en fonction de la température de recuit pour les deux séries d'échantillons.

Les contraintes résiduelles du nitrure et de la silice évoluent différemment avec la température de recuit (cf. figure 4.4) :

Pour les couches de nitrure :

- Avant recuit : les couches de HFSIN sont en tension avec +460 MPa, tandis que les couches de LFSIN sont fortement en compression avec -820 MPa.

- Après recuit : la contrainte résiduelle des couches de HFSIN atteint +1.26 GPa à 550 °C (le recuit a été stoppé à 550 °C pour éviter la rupture des wafers), et les couches de LFSIN passent d'une contrainte résiduelle en compression à une contrainte résiduelle en tension au-delà de 600 °C.

Il est intéressant de noter l'apparition de trous d'environ 10-20 μm de diamètre dans les couches de LFSIN recuites au-delà de 550 °C.

Pour les couches de silice :

La contrainte résiduelle reste en compression pour toutes les températures de recuit et les couches hautes fréquence sont moins contraintes que les couches basses fréquence. La contrainte résiduelle en compression atteint un minimum aux alentours de 600 °C, avec -70 MPa pour le HFSIO, et -200 MPa pour le LFSIO. Au-delà de 600 °C, la contrainte résiduelle redevient légèrement plus compressive pour les deux types de couche de silice.

4.3.2.2 Analyse FTIR des liaisons avec l'hydrogène

Les mesures FTIR permettent d'observer l'évolution de liaisons chimiques possédant des raies d'absorption dans le domaine infrarouge. Pour les couches de nitrures, j'ai étudié les pics d'absorbance des liaisons Si-N ($\sim 830\text{ cm}^{-1}$), Si-H ($\sim 2180\text{ cm}^{-1}$), et N-H ($\sim 3340\text{ cm}^{-1}$). Pour les couches de silice, les pics d'absorbance des liaisons Si-O ($\sim 1060\text{ cm}^{-1}$), et O-H ($\sim 3400\text{-}3650\text{ cm}^{-1}$) ont été examinés.

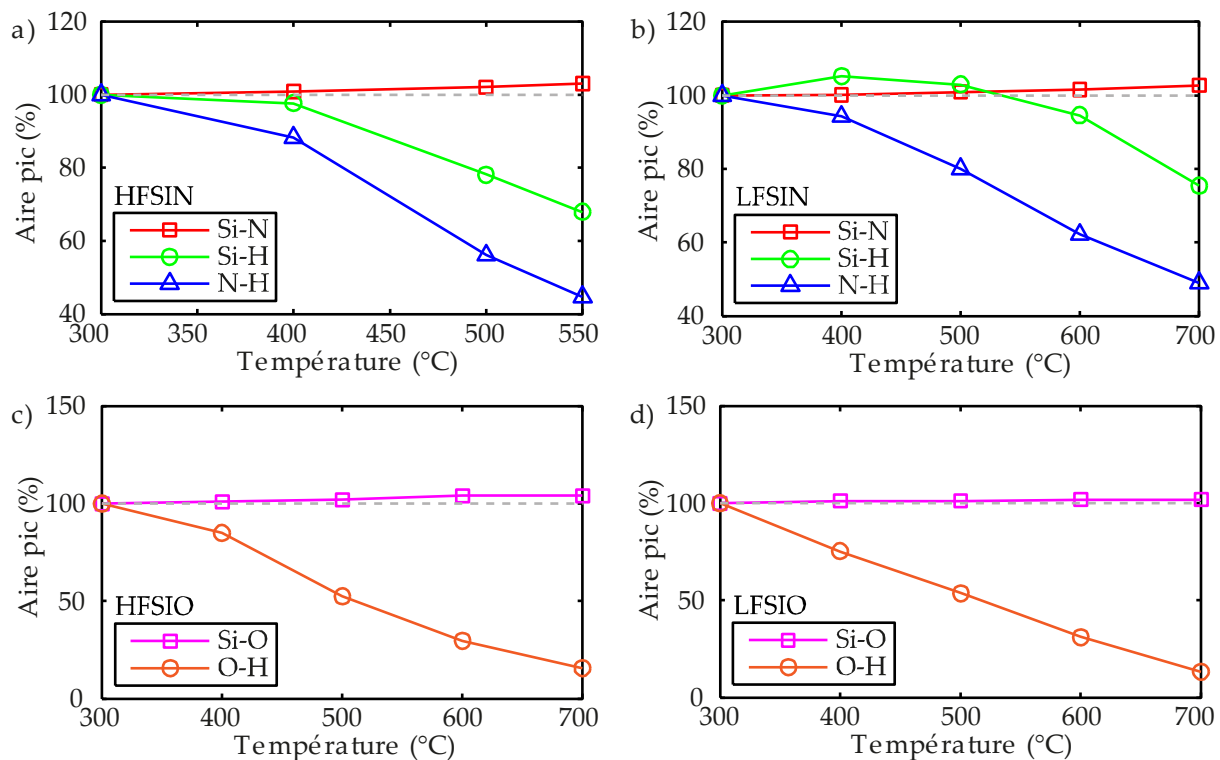


Figure 4.5 : Résultat des mesures FTIR montrant l'évolution de l'aire sous les pics d'absorbance pour les couches de nitrure et de silice PECVD en fonction de la température de recuit. a) HFSIN série 1, b) LFSIN série 1, c) HFSIO série 2, d) LFSIO série 2.

La figure 4.5 regroupe les variations d'aire des pics d'absorbance après retrait de la ligne de base (procédure détaillée en annexe D p201). Seule une moitié des mesures est présentée, car les deux séries d'échantillons ont montré un comportement similaire.

Pour les films de nitrure déposés à haute fréquence (figure 4.5a) et basse fréquence (figure 4.5b), l'évolution des liaisons Si-N et N-H est similaire : les liaisons Si-N augmentent tandis que le nombre de liaisons N-H diminue.

Cependant, les liaisons Si-H ont un comportement différent :

- pour le HFSIN : l'absorbance des liaisons Si-H diminue continuellement d'abord lentement entre 300 et 400 °C, puis rapidement au-delà de 400 °C ;
- pour le LFSIN : il y a formation de nouvelles liaisons Si-H entre 300 et 400 °C. La concentration des liaisons Si-H diminue au-delà de 400 °C tout en restant supérieure au niveau initial entre 400 et 500 °C. L'apparition des trous semble coïncider avec la baisse des liaisons Si-H en dessous de leur niveau initial.

Ainsi, les mesures FTIR des couches de nitrure montrent trois régions de température : 300-400, 400-500 et >500 °C. Ces différentes régions de températures correspondent à celles observées sur les mesures de contrainte résiduelle de la figure 4.4, et montrent donc que l'évolution des contraintes résiduelles pendant le recuit est liée à la désorption de l'hydrogène et la formation de liaisons Si-N. Des observations similaires ont été rapportées dans les références [Danaie 2002 ; Stein 1979].

Pour les couches de silice (figure 4.5c et figure 4.5d) les mesures FTIR montrent aussi qu'il y a désorption de l'hydrogène pendant le recuit, car les liaisons O-H diminuent de manière continue tout au long du recuit pendant que de nouvelles liaisons Si-O se forment. A 700 °C presque toutes les liaisons O-H ont disparu. La variation de l'aire des pics d'absorbance ne permet cependant pas d'expliquer la légère augmentation des contraintes résiduelles compressives observées sur les couches de silice au-delà de 600 °C. L'augmentation de la contrainte thermomécanique (compressive) est peut-être une explication.

4.3.2.3 Variation des indices et des épaisseurs

Pour pouvoir fabriquer des miroirs multicouches, il est nécessaire de maîtriser l'épaisseur et l'indice de chaque couche. Les variations d'indices mesurés par ellipsométrie mono-longueur d'onde sont tracés sur la figure 4.6. Les variations d'indice et d'épaisseur sont inférieures à 1-2 % pour la plupart des couches. Les variations les plus importantes ont été observées sur les couches de HFSIN avec 3 % de variation d'épaisseur à 550 °C. Les recuits devraient donc avoir un faible impact sur les propriétés optiques des couches.

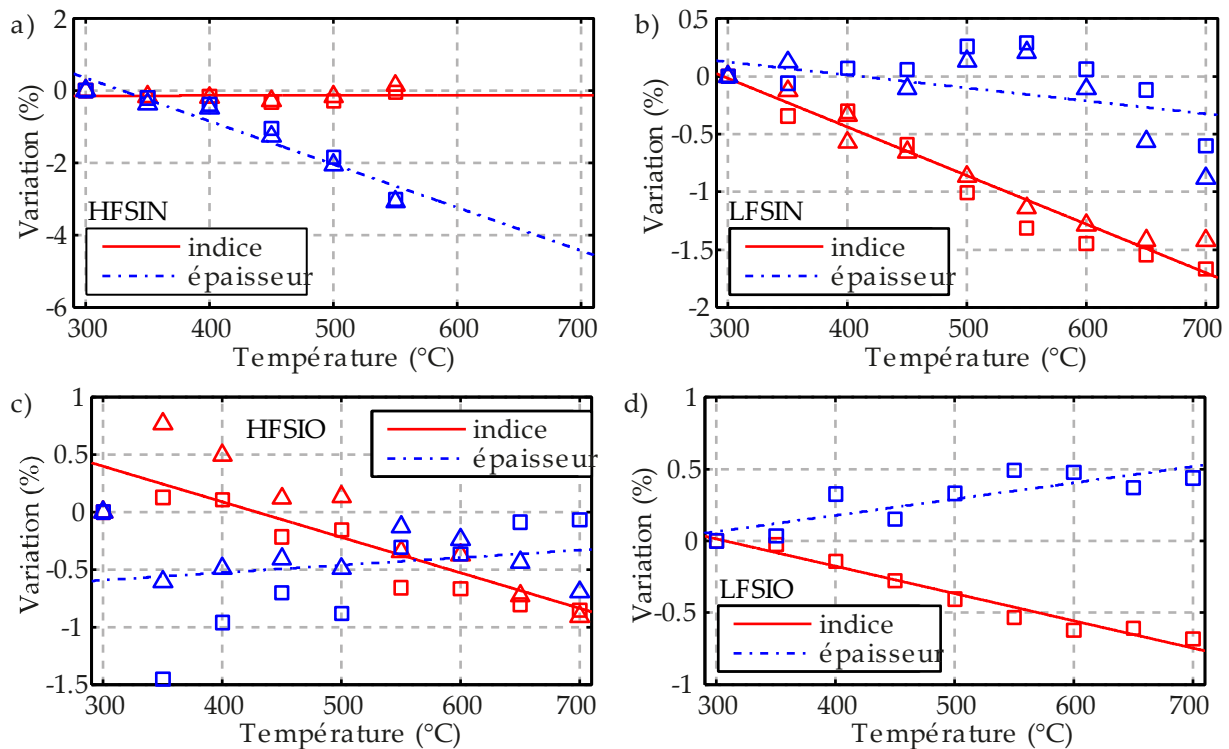


Figure 4.6 : Variation d'indice et d'épaisseur en fonction de a) température de recuit. a) HFSIN, b) LFSIN, c) HFSIO, d) LFSIO.

4.3.3 Conclusion : choix des couches à utiliser

Il faut donc réussir à compenser les contraintes compressives de la silice à l'aide des couches de nitrure de silicium. Bien que la reproductibilité des indices et des vitesses de dépôt soit meilleure avec les couches de HFSIN, nous avons utilisé les couches de LFSIN. En effet, l'utilisation du LFSIN permet de minimiser les écarts de contraintes résiduelles avec les couches de silice. Il est aussi intéressant de noter que l'apparition de trous dans les couches de LFSIN recuites a été observée au-delà de 550 °C. Ce phénomène a une importance non négligeable sur la qualité du recuit des multicouches et sera discuté plus loin.

Pour les couches de silice, le LFSIO a été choisi car l'indice obtenu est en moyenne plus faible que celui des couches de HFSIO.

4.4 Recuit des miroirs multicouches

La partie précédente sur le recuit de couches uniques a permis de mettre en évidence le rôle des liaisons hydrogène sur la contrainte résiduelle. Pour tenter de réduire cette accumulation d'hydrogène, des recuits avec des rampes en température très variables ont été testés afin de favoriser la diffusion interne et dégazage de l'hydrogène. Les recuits ont été effectués sur les deux multicouches dimensionnés dans la partie 3.1.3 (p55). Pour rappel, les deux dimensionnements de multicouches sont les suivants :

SiO ₂ (L) / Si ₃ N ₄ (H) : épaisseur totale 896.9 nm, 8 couches

Silicium / H 67.5 / L 117.6 / H 82.6 / L 114.7 / H 132 / L 205.8 / H 51.2 / L 125.5 / Air

Tableau 4.9 : Epaisseurs en nanomètres des couches à déposer pour le premier dimensionnement du miroir mobile. Avec "H" pour désigner la couche d'indice élevée et "L" pour désigner la couche d'indice faible.

SiO ₂ (L) / Si ₃ N ₄ (H) : épaisseur totale 1393.5 nm, 12 couches

Silicium / L 108.3 / H 117.3 / L 19 / H 180.7 / L 205.3 / H 53.1 / L 228.2 / H 90 / L 116.3 / H 84.1 / L 112.4 / H 79.1 / Air

Tableau 4.10 : Epaisseurs en nanomètres des couches à déposer pour le dernier dimensionnement du miroir mobile. Avec "H" pour désigner la couche d'indice élevée et "L" pour désigner la couche d'indice faible.

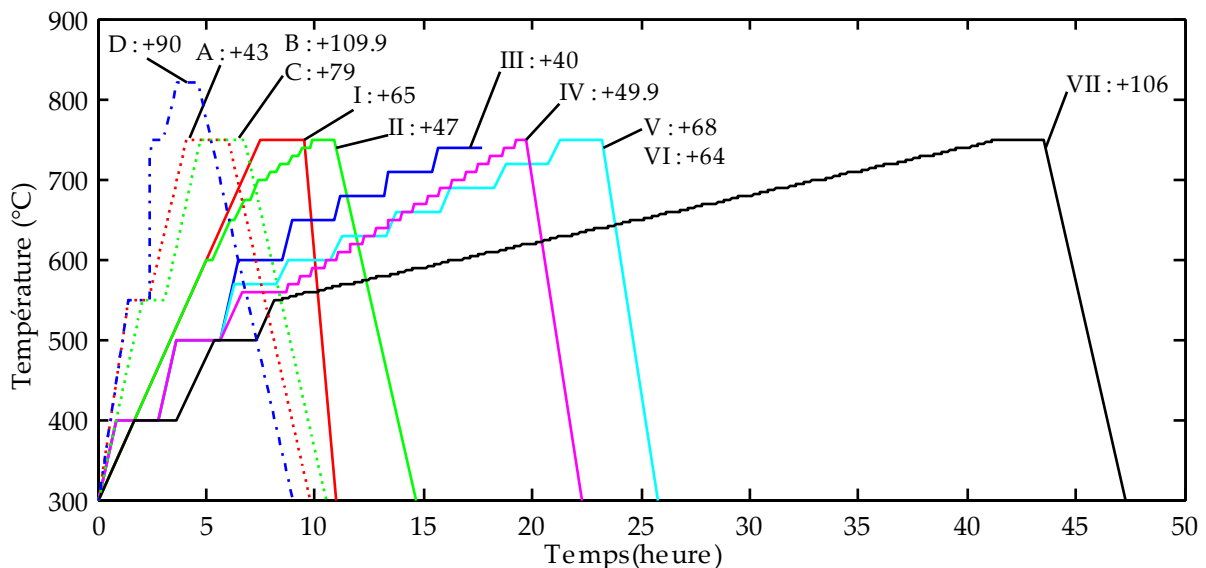


Figure 4.7 : Rampes de recuit utilisées pour les différents miroirs, la valeur de contrainte résiduelle obtenue après recuit (en MPa) est indiquée à droite du N° d'échantillon. En trait plein, les miroirs pour lesquels le nitrure est déposé en premier. En pointillé, les miroirs pour lesquels de la silice est déposée en premier (cf. tableau 4.9).

Tous les miroirs utilisent le premier dimensionnement de multicouche (cf. tableau 4.9), seul le miroir D a utilisé le dernier dimensionnement de multicouche (cf. tableau 4.10).

La majorité des recuits réalisés pendant cette thèse ont utilisé le premier dimensionnement des miroirs, et seul un recuit (noté D sur la figure 4.7) a été réalisé avec le dernier

dimensionnement. Les valeurs de toutes les rampes de recuit qui ont été utilisées sont indiquées dans la figure 4.7. De manière générale les recuits de multicouche nous ont permis d'obtenir des contraintes résiduelles en tension allant de +40 à +110 MPa. La température de recuit nécessaire est cependant différente selon le dimensionnement du multicouche. Ainsi, le premier dimensionnement a nécessité un recuit à 750 °C, et le dernier dimensionnement a nécessité un recuit à 820 °C.

4.4.1 Reproductibilité des recuits

Pour explorer la reproductibilité des recuits nous avons réalisé un total de cinq recuits (échantillons I, II, IV, V, VI) avec des rampes de température très variables et une température maximale de 750 °C. La majorité des recuits ont eu des paliers de stabilisation autour des températures identifiées précédemment lors des recuits sur monocouche (400, 500-550, et 750 °C). Les fours ne permettant pas de faire de rampes inférieures à 1 °C/min, pour réduire artificiellement la vitesse de montée en température du recuit, il a fallu utiliser des paliers successifs très courts.

Les multicouches I, II, IV, V, VI ont été déposés sur une période de deux mois, la valeur moyenne des contraintes avant et après recuit sont les suivantes :

- avant recuit, une valeur moyenne de -491 ± 30 MPa ;
- après recuit, une valeur moyenne de $+59 \pm 9$ MPa.

Ces valeurs montrent que les recuits sont très reproductibles, car malgré le fait d'avoir avant recuit une dispersion des contraintes résiduelles de ± 30 MPa, après recuit à 750 °C, on obtient en moyenne +59 MPa avec seulement ± 9 MPa d'écart. De plus, il semblerait que lors d'un recuit plus long, les contraintes résiduelles tendent vers un équilibre, car l'échantillon N° VII qui a eu un recuit deux fois plus long, a une contrainte résiduelle finale (+106 MPa) qui n'est pas très éloignée de la valeur moyenne.

Cependant, il semble qu'il y ait à la fois une durée minimale de recuit ainsi que certains paliers à respecter. En effet, les recuits sur les échantillons A, B, et C (qui ont utilisé les mêmes épaisseurs de couches, mais dont l'ordre de dépôt des couches a été inversé) sont beaucoup plus courts (6-7 heures au lieu d'environ 10 heures) et un seul palier à 550 °C a été effectué. Ces trois échantillons donnent des résultats après recuit qui sont assez différents (± 34 MPa). Pourtant les échantillons A, B, et C ont été déposés le même jour, et les échantillons B et C ont été recuits en même temps. Par comparaison, les échantillons V et VI, qui ont bénéficié d'un recuit plus long, ont été déposés le même jour et recuits en même temps, or leur contrainte résiduelle est identique à 4 MPa près. Il est donc possible qu'il soit nécessaire de faire des recuits plus longs avec certains paliers pour obtenir des résultats reproductibles. Cependant, cela n'a pas encore pu être prouvé et nécessiterait quelques essais supplémentaires.

4.4.2 Prévision de la température minimale de recuit

Les précédentes expériences de recuit sur des films individuels (décrits dans la partie 4.3.2 p115) ont fourni des valeurs de contrainte résiduelle en fonction de la température. Ces valeurs ont été utilisées pour essayer de prévoir l'évolution de la contrainte résiduelle dans un multicouche, l'objectif étant d'avoir une estimation à l'avance des températures de recuit nécessaires.

La contrainte résiduelle moyenne des multicouches a été estimée à l'aide de la formule (4.1) (p112) recopiée ci-dessous, où σ_i est la contrainte résiduelle de la couche i , et t_i son épaisseur :

$$\sigma_{tot} = \frac{\sum_i \sigma_i t_i}{\sum_i t_i} \quad (4.1)$$

Pour comparer les valeurs de contrainte résiduelles simulées et mesurées, nous avons dû sortir les wafers du four à la fin de certains des paliers pour mesurer la contrainte résiduelle. Deux échantillons ont été utilisés pour cette étude : III et D (cf. figure 4.7).

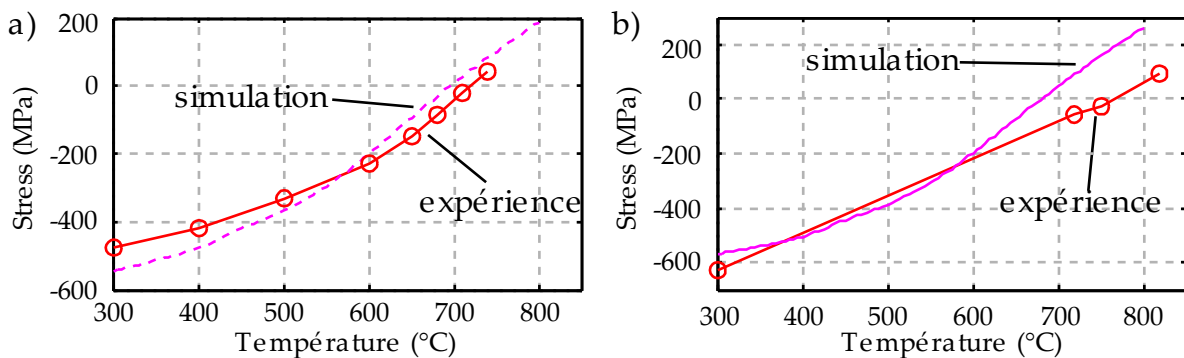


Figure 4.8: Contraintes résiduelles en fonction de la température pour un recuit de miroir multicouche LFSIN/LFSIO et comparaison avec les estimations des contraintes moyennes en utilisant les contraintes résiduelles mesurées dans la partie précédente.

a) Recuit de l'échantillon III utilisant les épaisseurs du premier dimensionnement du miroir.

b) Recuit de l'échantillon D utilisant les épaisseurs du dernier dimensionnement du miroir.

L'échantillon III est composé de l'empilement de couches du premier dimensionnement des miroirs. L'évolution de la contrainte résiduelle en fonction du recuit a été mesurée pour différentes températures (400 °C, 500 °C, 600 °C, 650 °C, 680 °C, 710 °C et 740 °C). La comparaison entre les valeurs simulées et mesurées est présentée dans la figure 4.8a. Sur ce premier essai, l'allure générale de la variation de la contrainte avec la température de recuit est en bon accord avec les valeurs simulées, car la température pour laquelle la contrainte résiduelle passe en tension présente un écart de 20 °C.

L'échantillon D est composé de l'empilement (plus épais) de couches du dernier dimensionnement des miroirs. Cette fois-ci les températures pour lesquelles nous avons

mesuré la contrainte résiduelle sont moins espacées (720 °C, 750 °C, et 820 °C) que lors du premier essai. Ces températures ont été choisies principalement pour permettre de s'assurer que la contrainte résiduelle ne soit pas trop importante, car cet échantillon a été le tout premier (et dernier) essai de recuit sur les nouveaux multicouches développés en fin de thèse. La comparaison entre les simulations et la mesure montre des écarts plus importants de contrainte résiduelle, car la température pour laquelle la contrainte résiduelle passe en tension présente un écart de 90 °C par rapport à la valeur simulée. Cependant, il est important de noter que sur cet échantillon, la durée totale du recuit a été d'à peine 5 heures, ce qui est beaucoup plus rapide que pour l'échantillon III qui a bénéficié d'un recuit sur 18 heures (cf. figure 4.7).

Ainsi, les résultats montrent qu'il n'est pour l'instant pas possible de prévoir la température de recuit à partir des contraintes résiduelles moyennes. Ceci n'est pas trop surprenant, car on peut penser que la désorption et la diffusion de l'hydrogène ne sont pas identiques pour un film individuel et pour le même film dans un multicouche surtout s'il est fortement enterré. D'autre part, on s'attend à ce que le coefficient de diffusion de l'hydrogène soit très différent entre la silice et le nitrure, produisant une distribution d'hydrogène inhomogène en profondeur. Il faudra cependant refaire l'expérience sur le dernier dimensionnement de multicouche avec un recuit plus lent, car les écarts importants observés sur l'échantillon D peuvent provenir d'un recuit trop rapide.

4.4.3 Apparition de trous après recuit

Le plus gros problème qu'il a fallu résoudre lors du recuit de multicouches est l'apparition de trous. Le tout premier essai de recuit a été réalisé sur le premier dimensionnement de multicouche avec une couche de LFSIN déposé en premier (cf. tableau 4.9). Le wafer a été recuit à 700 °C sans rampe de montée en température. Le résultat de ce recuit a été catastrophique (cf. figure 4.9), car le multicouche est parsemé de trous pouvant atteindre un millimètre de diamètre.

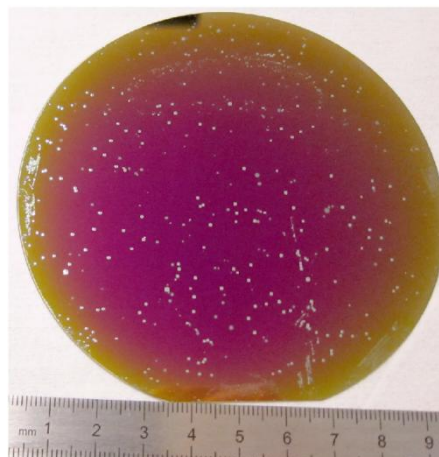


Figure 4.9 : Image d'un miroir multicouche après recuit à 700 °C, sans rampe de montée en température. Les autres recuits, plus lents, ont formé des trous invisibles à l'œil nu.

Il est intéressant de remarquer que les défauts semblent se concentrer là où il y a des impuretés : par exemple, sur la figure 4.9 une concentration élevée de trous est visible aux endroits où le wafer a été maintenu par une pince, et en haut de l'échantillon l'ensemble de trous fait penser à un mauvais rinçage du wafer.

L'origine de ces défauts a été attribuée à une adhérence limitée du LFSIN sur le silicium et au dégazage de l'hydrogène contenu dans les couches PECVD, formant des cloques qui en éclatant font des trous. Trois observations permettent de confirmer cette hypothèse :

Premièrement, les trous n'apparaissent qu'à l'interface silicium/nitruure, aucun des trous n'est apparu aux interfaces entre les films de silice et de nitruure de silicium. Ceci est visible sur la figure 4.10 avec la teinte « gris silicium » du fond des trous.

Deuxièmement, l'apparition de trous a aussi été observée dans les couches individuelles de LFSIN recuites au-delà de 550 °C (cf. partie 4.3.2.1 p115).

Enfin troisièmement, l'évolution de la contrainte résiduelle en fonction de la température du recuit de l'échantillon III (cf. figure 4.8a) nous a permis de constater que les trous apparaissent entre 500 et 600 °C, c'est à dire dans la même gamme de températures que lors des recuits sur couche individuelle de LFSIN (cf. partie 4.3.2.1 p115).

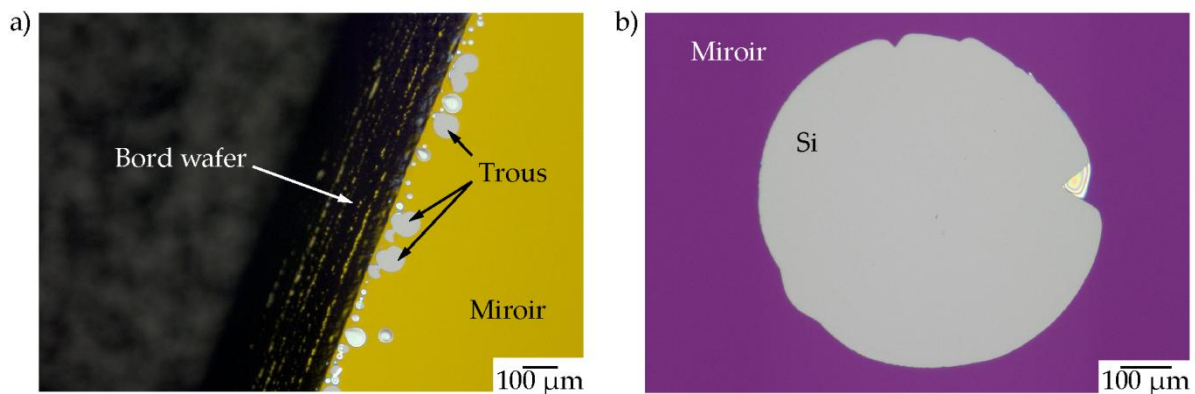


Figure 4.10 : a) Images prise au microscope optique sur le bord du wafer, où se situent un grand nombre de trous causé par l'éclatement des cloques. A certains endroits, les cloques n'ont pas éclaté, elles sont cependant repérables à leur teinte non grise et grâce à la présence de franges d'interférences.

b) Agrandissement d'une cloque éclatée.

Ces trous doivent être éliminés, car ils dégradent la réflectance du miroir, et aussi parce qu'ils sont une source d'amorce de rupture des membranes et de défauts de planéité (à cause des contraintes). Pour résoudre ce problème plusieurs solutions ont été, soit essayées, soit trouvées dans la littérature :

- Faire des rampes plus lentes : cette solution n'a pas éliminé les trous. Elle a été testée lors des recuits plus longs sur les échantillons I à VII (cf. figure 4.7). Elle a seulement permis de réduire le diamètre des trous à 20-60 µm.
- Mettre au point une combinaison de couches nécessitant un recuit inférieur à 550 °C : cette solution a été testée une fois, mais la contrainte résiduelle du multicouche s'étant avérée difficile à prévoir, pour obtenir une contrainte en tension, le

multicouche a dû être recuit au-delà de 550 °C et donc l'apparition de trous n'a pas pu être évitée. Cette solution pourrait fonctionner mais nécessiterait plus d'essais.

- Déposer la silice en premier : cette solution a été testée avec succès sur les échantillons A, B, C, et D. De plus elle est compatible avec le dimensionnement final du multicouche.
- Faire un traitement plasma avant dépôt : certains auteurs [Fourmond 2008 ; Hauser 2003] rapportent qu'un traitement du wafer à l'aide d'un plasma de NH_3 permet d'éviter le décollement du nitrure. Faute de temps, cette méthode n'a pas pu être essayée.

Ainsi, aucun des recuits longs réalisés sur le premier dimensionnement de multicouche (où le nitrure est déposé en premier) n'a permis de supprimer les trous. Cependant, le diamètre des trous a pu être réduit à 20-60 μm . Pour éliminer les trous, la seule solution testée avec succès a consisté à déposer la silice en premier. De manière plus générale, s'il est nécessaire de déposer la couche de nitrure en premier, il faudra tester la méthode de prétraitement du silicium par plasma, ou concevoir un multicouche pouvant être recuit à moins de 550 °C.

4.4.4 Recuit d'un miroir structuré

Enfin nous avons testé le recuit d'un miroir multicouche structuré. La méthode de gravure humide à l'aide d'une solution tampon d'acide fluorhydrique (BHF) a été préférée à une gravure de type sèche, car la gravure humide a une meilleure sélectivité et n'endommage donc pas trop le silicium. Cependant, il faut faire la structuration avant le recuit, car la désorption de l'hydrogène et la densification des films augmente la résistance chimique du nitrure [Stein 1979]. Les miroirs seront donc recuits après structuration, à condition d'avoir pu vérifier qu'aucun désagrément supplémentaire ne puisse apparaître.

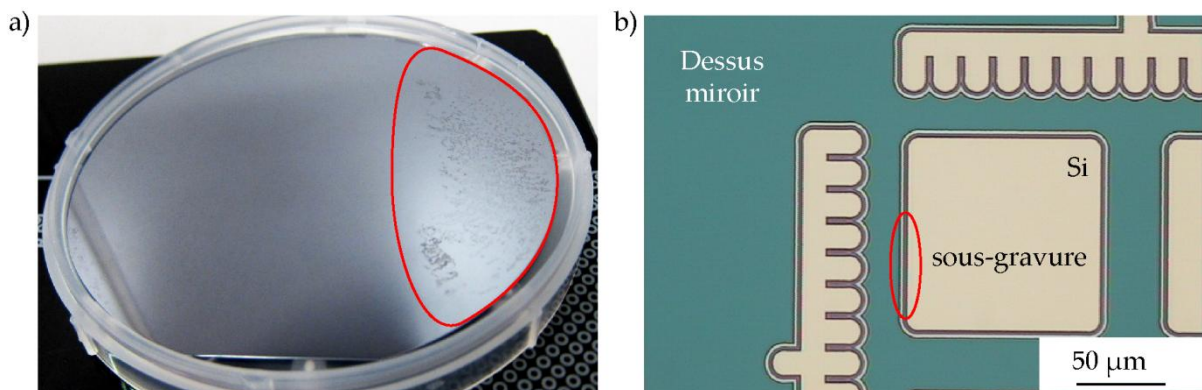


Figure 4.11 : a) Photographie de la face arrière du wafer, non protégée pendant la gravure. Après la gravure des défauts (entourés en rouge) sont apparus sur le silicium. Un enrésinement de cette face avant gravure permettra d'y remédier.

b) Image prise au microscope optique montrant une portion de croix d'alignement : la différence de vitesse de sous-gravure entre les différentes couches est visible.

La structuration a été faite à l'aide d'un masque en résine S1828 (marque Shipley) d'environ 3 μm d'épaisseur recuit à 115 °C pendant 1 minute 30 secondes. Après insolation et développement de la résine, un plasma O_2 d'une minute et un rinçage dans de l'eau

désionisée ont été employés pour nettoyer le fond des motifs développés et pour améliorer la mouillabilité de la surface. La structuration du multicouche a nécessité une heure de gravure. La résine a bien tenu et les fonds des motifs sont bien dégagés, signe qu'il ne restait pas de fine couche de résine bloquant la gravure (cf. figure 4.11b). Cependant, deux défauts (non critiques) ont été mis en évidence. Premièrement, la face arrière du wafer a été endommagée (cf. figure 4.11a), elle devra donc être protégée par un masque en résine. Deuxièmement la différence des vitesses de gravure entre la silice et le nitrure de silicium conduit, sur le premier dimensionnement de multicouche, à une sous gravure latérale totale de 10-15 μm (cf. figure 4.11b). Cette sous gravure n'est pas gênante, mais doit être prise en compte lors du dessin des masques.

Pour cet essai, nous avons utilisé le premier dimensionnement des miroirs où la première couche déposée est une couche de nitrure de silicium. Le recuit ayant été fait à 750 °C, le seul défaut remarqué est l'apparition de trous. Notons par ailleurs que ce recuit n'a pas permis de mettre en évidence un effet notable de la structuration du multicouche sur la distribution des trous.

Ainsi le recuit d'un miroir structuré ne pose pas de difficultés supplémentaires. Il suffira de faire la gravure des miroirs avant le recuit. Pour la gravure quelques précautions sont à prendre : il faudra protéger la face arrière du wafer avec une couche de résine, faire un plasma O₂ pour nettoyer le fond des motifs, et tremper le wafer dans de l'eau avant de commencer la gravure pour assurer l'absence de bulles empêchant la gravure. Après l'étape de gravure il suffira de rincer et nettoyer le wafer, puis de faire le recuit.

4.4.5 Conclusion sur les mesures de contraintes résiduelles

L'analyse des contraintes résiduelles dans les couches individuelles a permis de mettre en évidence l'existence de plusieurs régimes d'évolution de ces contraintes. Les couches de nitrure évoluent linéairement, avec plusieurs pentes dans plusieurs zones bien délimitées de températures identiques.

Pour le HFSIN, les couches sont déjà en tension, et cette tension augmente avec le recuit. Cependant, pour éviter les contraintes résiduelles supérieures à 1 GPa, il faudra cependant maintenir le recuit de cette couche à moins de 550 °C.

Pour le LFSIN, les couches sont d'abord en compression, la contrainte résiduelle diminue, puis elle passe en tension à partir de 630 °C. Cette tension continue d'augmenter avec la température.

Pour les deux types de couches de silice (HFSIO et LFSIO), la contrainte résiduelle reste en compression et semble passer par un minimum de contrainte à 625 °C pour le HFSIO et à 660 °C pour le LFSIO.

Le plus gros problème à résoudre a été l'apparition de trous après recuit à $T > 550$ °C des films de nitrure de silicium PECVD basse fréquence (LFSIN). Le même phénomène a été observé sur les multicouches (qu'ils soient structurés ou non) recuits à $T > 550$ °C et lorsque la première couche déposée sur le silicium est du LFSIN. L'origine des trous a été attribuée à l'éclatement de cloques formées par accumulation d'hydrogène (et éventuellement d'autres gaz désorbés) à l'interface silicium/LFSIN, phénomène favorisé par la présence d'impuretés avant dépôt.

Pour y remédier, trois solutions ont été proposées : déposer la silice en premier, utiliser une combinaison de couches permettant un recuit inférieur à 550 °C, et faire un traitement plasma avant dépôt pour améliorer l'adhérence du nitrure sur le silicium. La première solution a été testée avec succès et a été retenue pour la fabrication des miroirs multicouches. Les deux autres solutions n'ont pas été testées et nécessiteraient des essais supplémentaires.

Les recuits de multicouche semblent donner des contraintes résiduelles reproductibles à condition de faire des recuits suffisamment longs. Pour l'instant, l'impact positif sur la reproductibilité d'un recuit long et des paliers de stabilisation aux températures identifiées par les mesures FTIR n'a pas pu être formellement prouvé. Pour optimiser les paramètres de recuits, il faudra donc au préalable étudier leur impact en détail. Cependant, les résultats actuels sont satisfaisants et nous ont permis d'ajuster la contrainte résiduelle des deux multicouches différents conçus pendant cette thèse.

Il est important de noter que les recuits de multicouches devront être effectués après la structuration des miroirs, car la désorption de l'hydrogène renforce la résistance à la gravure BHF des couches de nitrure.

La partie suivante est consacrée à la libération des membranes multicouches et à leur caractérisation.

4.5 Libération et propriétés des membranes

4.5.1 Procédé de libération des membranes et rendement

Rappelons que les miroirs ajustables des filtres Fabry Péroต์ sont sous forme de membranes composées d'un multicouche diélectrique déposé et recuit sur silicium. La réalisation de chaque filtre nécessite de libérer 4 membranes, côte à côte, faisant à peine $1\ \mu\text{m}$ d'épaisseur et 5 à 6 mm de diamètre : il y a donc un risque élevé de rupture des membranes. Dans ce sous-chapitre je décrirai en premier les essais de fabrication des membranes, puis je conclurai le chapitre par la mesure de la planéité et de la réflectance des membranes.

Les tests de ce procédé de libération de membranes ont été effectués avec le masque visible dans la figure 4.12. Ce masque a été dessiné lors de la première conception de matrices de filtres en technologie SOI (cf. l'annexe E.4 p213), il utilise donc des ouvertures octogonales à la place d'ouvertures circulaires et hexagonales. Plusieurs tailles d'octogones ont été utilisées, elles sont listées dans le tableau 4.11.

apothème (diamètre cercle inscrit) (μm)	5896	5360	4028	2680	1000
nombre de matrices de 4 membranes	2	2	2	2	0
nombre de membranes uniques	0	4	0	0	8

Tableau 4.11 : Taille des membranes octogonales et nombre de matrices ou de membranes uniques présentes sur le masque.

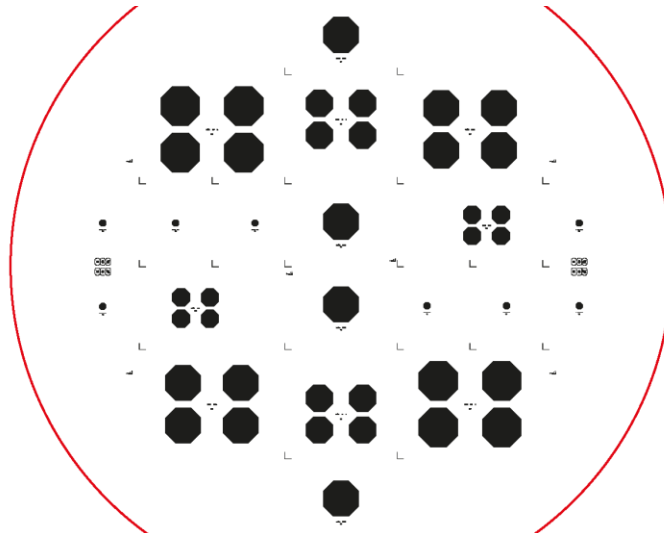


Figure 4.12 : Masque dessiné pour tester la libération des miroirs, en noir les parties qui seront gravées, en rouge la périphérie du wafer.

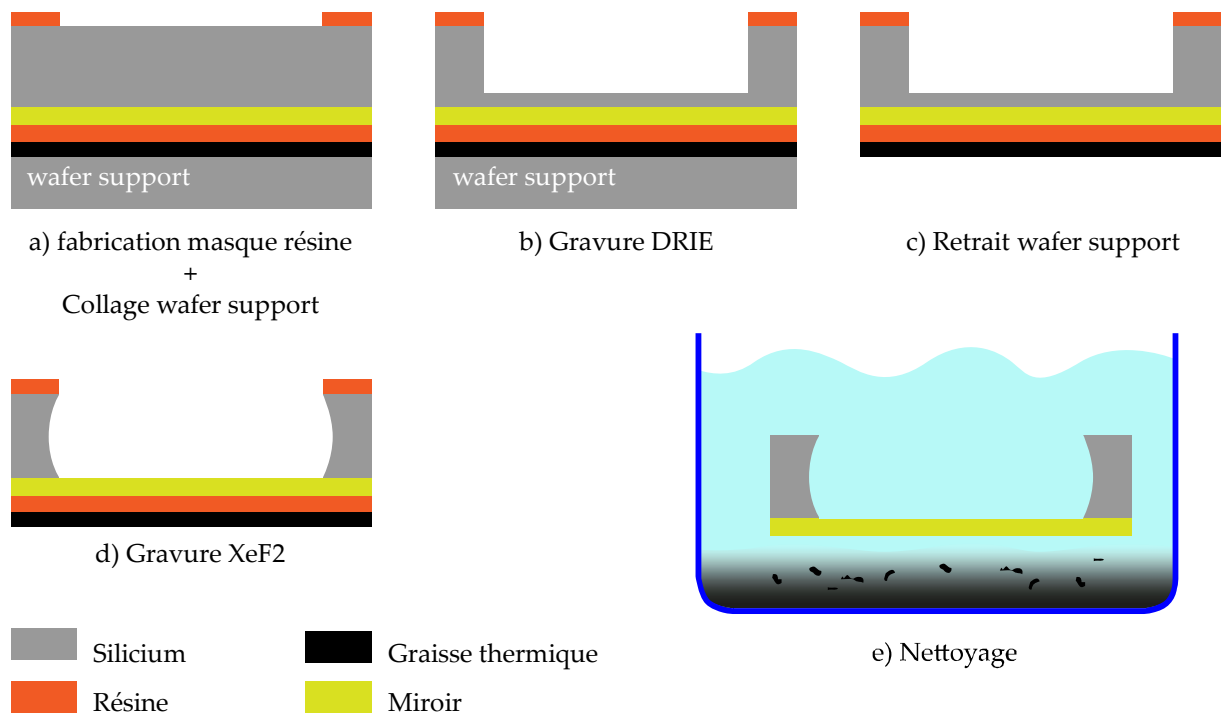


Figure 4.13 Procédé de fabrication des membranes.

La libération des membranes repose sur une gravure profonde du substrat de silicium, à travers des ouvertures réalisées dans une couche de masquage déposée en face arrière du wafer. Une difficulté majeure est de réaliser une gravure profonde du silicium sans modifier l'épaisseur du multicouche, car sinon la réflectance spectrale des miroirs serait fortement modifiée. Or la gravure DRIE, avec son bombardement ionique et les espèces chimiques utilisées, grave légèrement le nitrure et la silice. Pour surmonter cette difficulté, la libération des membranes a été réalisée à l'aide de deux gravures différentes :

La première gravure est une gravure anisotrope par DRIE (Deep Reactive Ion Etching). Elle consiste à graver environ 300-350 μm de silicium par DRIE avec le procédé Bosch décrit dans la partie 2.3.2.3 (p38) en ne laissant, en fin de gravure, qu'une fine couche de 10-20 μm de silicium sous les miroirs (cf. figure 4.13a et b).

Pour les gravures profondes, le bâti de gravure DRIE STS requiert l'assemblage d'un wafer support de 525 μm d'épaisseur avec de la graisse thermique. En effet, dans le bâti, les wafers sont plaqués sur un joint torique permettant le refroidissement de la face arrière du wafer avec de l'hélium gazeux. Le wafer support sert à éviter les fuites d'hélium (par les gravures débouchantes) et à rigidifier le wafer gravé (car il peut casser sous la pression des clamps de maintien). Cependant, la graisse thermique étant très difficile à nettoyer, il faut au préalable protéger les miroirs avec une couche de résine.

Une fois la gravure DRIE terminée, nous retirons le wafer support (figure 4.13c), car à cette étape, la fine couche de silicium restant sur le wafer cible est suffisamment robuste pour pouvoir le décoller du wafer support sans risquer d'endommager les membranes.

La seconde gravure est isotrope et très sélective (figure 4.13d). Elle consiste à retirer la fine couche de silicium restante par une gravure chimique utilisant la décomposition du difluorure de xénon (XeF_2) à la surface du silicium. C'est une gravure de type sèche qui forme des composés volatils identiques à ceux obtenus dans la DRIE, mais la sélectivité est très élevée et seul le silicium est gravé.

Enfin, la dernière étape (figure 4.13d) consiste à nettoyer le wafer dans un remover liquide (P1316 à 60 °C pendant 2 minutes). L'utilisation d'un remover est nécessaire car après la DRIE, la résine est réticulée et n'est plus soluble dans de l'acétone. Pour éviter le re-dépôt de la graisse thermique sur les miroirs, il est important de maintenir tournée vers le bas la face enduite par cette graisse thermique.

Le rendement du procédé s'est avéré excellent avec en général 100 % de membranes intactes (figure 4.14a). Ce rendement élevé a pu être obtenu parce que le wafer support est retiré avant la gravure avec XeF_2 . Les membranes se sont même avérées suffisamment résistantes pour permettre un séchage avec une soufflette d'azote et une découpe par clivage des puces. Des membranes non recuites (contraintes en compression) ont aussi pu être libérées par ce procédé (figure 4.14c). Ceci montre à quel point la méthode de libération est douce.

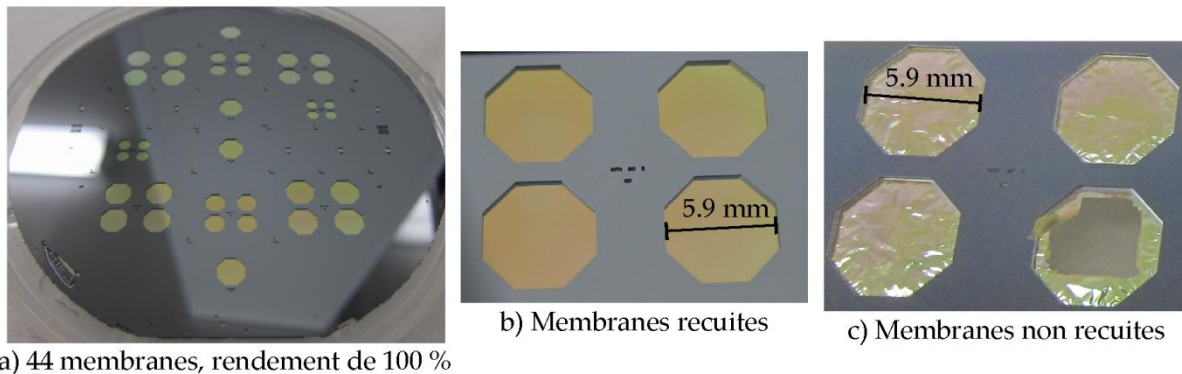


Figure 4.14 : Images de membranes (8 couches) libérées et nettoyées. a) Une vue d'ensemble du wafer montrant toutes les membranes libérées. b) Un agrandissement de membranes recuites. c) Un agrandissement de membranes non recuites, flambées par les contraintes en compression.

4.5.2 Propriétés géométriques et optiques des membranes

Les mesures de la réflectance des membranes ont été faites en transmission avec un ellipsomètre spectroscopique. Pour cette mesure, nous avons utilisé le dernier dimensionnement du multicouche : pour rappel, les épaisseurs déposées sont données dans le tableau 4.12 et la valeur attendue de la réflectance est environ $50.2 \pm 3 \%$ entre 550 nm et 850 nm.

SiO ₂ (L) / Si ₃ N ₄ (H) : épaisseur totale 1393.5 nm, 12 couches
Silicon / L 108 / H 117 / L 19 / H 181 / L 205 / H 53 / L 228 / H 90 / L 116 / H 84 / L 112 / H 79 / Air

Tableau 4.12 : Valeurs des épaisseurs (nm) pour le dernier dimensionnement de multicouche optimisé avec les indices mesurés sur les couches de LFSIN et LFSIO.

Toutes les précautions ont été prises pour le dépôt de ce multicouche :

- la chambre PECVD a été nettoyée par plasma et un pré-dépôt de 15 minutes de LFSIO a été effectué (sans échantillon) pour passiver la chambre ;
- les vitesses de dépôt et indices ont été étalonnés avant dépôt du multicouche.

La réflectance mesurée des membranes libérées oscille entre 40 et 60 % (environ) dans la gamme de longueurs d'onde 570-900 nm (figure 4.15a). Ces valeurs se situent dans la limite d'erreur estimée par TFCALC si l'on considère qu'il y a eu une variation normale de 2.5 % pour l'épaisseur et 1.5 % pour l'indice lors du dépôt et du recuit.

Nous avons utilisé TFCALC pour remonter aux valeurs d'épaisseurs correspondant à la réflectance mesurée. Le logiciel nous a donné des épaisseurs très écartées des valeurs attendues. Les écarts d'épaisseurs sont représentés dans le graphique de la figure 4.15b, les variations atteindraient au maximum +26 nm pour le LFSIO et -17 nm pour le LFSIN. Ces écarts ne montrent pas une variation monotone et laissent penser que les vitesses de dépôt n'ont pas été soit sous-estimées, soit surestimées.

La fiabilité de cette analyse est incertaine, car d'autres combinaisons d'épaisseurs peuvent donner la même réflectance. Mais si on la considère valide, elle indiquerait que les écarts les plus importants (20-24 %) se situeraient en début et en fin de dépôt et seraient très supérieurs aux variations qui devraient avoir lieu lors des recuits (2.5 % estimés dans la partie 4.3.2.3 p118). Ce résultat ne semble pas trop aberrant car les couches les plus enterrées et les plus superficielles sont, a priori, celles où la désorption/diffusion de l'hydrogène est respectivement la plus restreinte et la plus aisée. Les résultats ne permettent pas de conclure sur l'origine précise de l'écart entre la réflectance prévue et la réflectance mesurée : soit le recuit produit un effet inhomogène en profondeur, ce qui est tout à fait possible, soit les écarts sont dus à une variation des vitesses de dépôt, soit ces deux effets apportent leur contribution.

Une expérience qui pourrait donner des indications serait de mesurer la réflectance du multicouche pour une incidence non normale avant puis après recuit. La comparaison avec une simulation TFCALC nous permettra d'évaluer si la majorité des variations proviennent du dépôt ou du recuit.

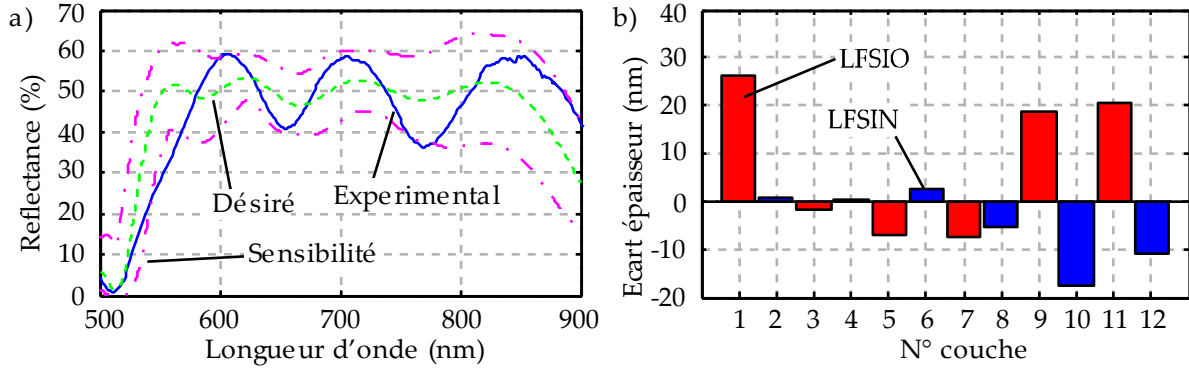


Figure 4.15 : a) Variation de la réflectance du multicouche en fonction de la longueur d'onde. Trait plein : valeurs mesurées ; Trait pointillé : valeurs simulées.

b) Ecart d'épaisseurs simulées par TFCALC pour obtenir la réflectance mesurée.

4.5.3 Planéité

Pour rappel, il faut que les miroirs n'aient pas de déformations supérieures à 30 nm sur toute leur surface (cf. partie 3.1.3.1 p55). La planéité des membranes a été évaluée par interférométrie à décalage de phase en lumière monochrome avec un interféromètre de Michelson développé initialement par Alain Bosseboeuf et Pierre Allain pour un système de flexion 4 points de puce [Alain 2012]. Nous ne ferons ici qu'une présentation rapide du système optique et du principe de démodulation des interférogrammes.

Le système optique (figure 4.16) comprend une source quasi monochrome à LED ($\lambda = 630 \text{ nm}$) qui est collimatée, filtrée et séparée en deux faisceaux à l'aide d'un cube séparateur. Le premier faisceau est réfléchi sur l'échantillon. Le deuxième faisceau est réfléchi sur un miroir de référence. Les 2 faisceaux sont ensuite recombinaés par le même cube séparateur, les interférences entre les 2 faisceaux sont imagées à l'aide d'un zoom sur une caméra monochrome. Le logiciel de pilotage, d'acquisition et d'analyse des interférogrammes est une version adaptée du logiciel F3D issu de plus d'une dizaine d'année de développements communs entre la société Fogale Nanotech (fogale.com) et notre département.

La mesure consiste à enregistrer des interférogrammes pour n positions distantes de $\lambda/2n$ du miroir de référence obtenues avec un translateur piézo-électrique. Les intensités mesurées sur chaque pixel sont combinées pour extraire la phase pliée des franges (modulo 2π) en chaque pixel. La phase $\phi = 4\pi z/\lambda$ est ensuite dépliée par continuité pour extraire le profil 3D $z(x,y)$ de l'échantillon. La résolution verticale de la mesure est de quelques 1/10 de nm et la résolution latérale pour le grandissement utilisé est de $\sim 16 \mu\text{m}$ pour un champ de mesure voisin de 1cm^2 .

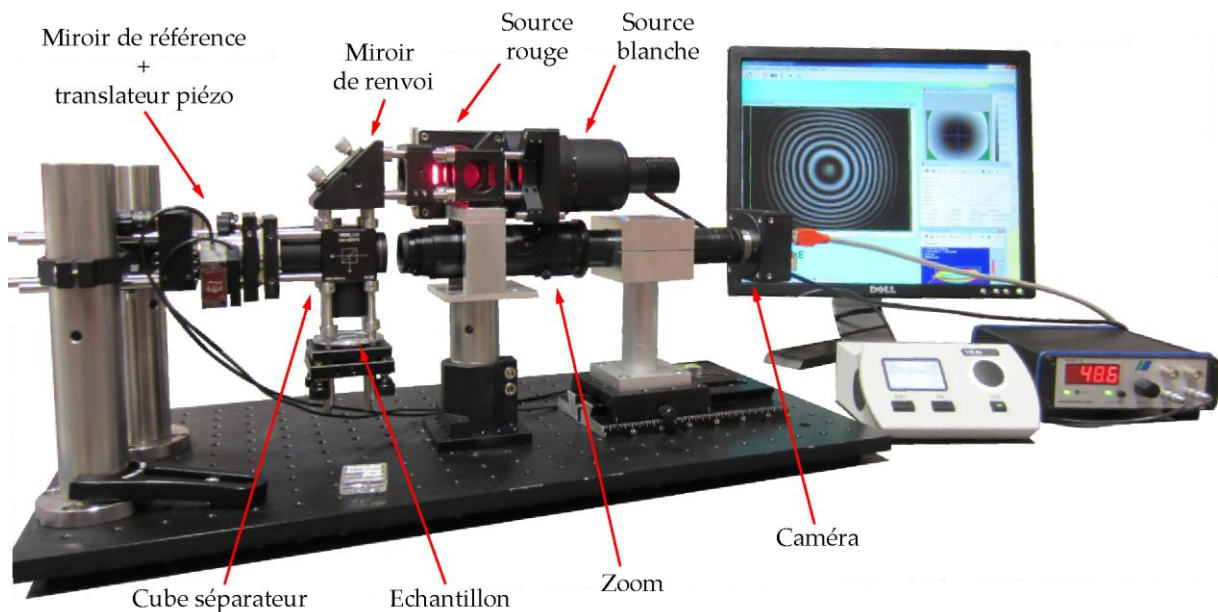


Figure 4.16 : Photographie de l'interféromètre.

Dans le cas des membranes semi-transparentes mesurées, la précision absolue des mesures de planéité a été évaluée à $\pm 10 \text{ nm}$ en tournant de 90° l'échantillon. Elle est essentiellement

limitée par : la planéité du miroir de référence ($\lambda/20$ sur un diamètre de 25.4 m), les modifications du front d'onde dans le montage optique, les variations d'épaisseur et d'indice du multicouche, et la procédure de redressement des profils 3D.

Les résultats présentés ci-après supposent implicitement que l'épaisseur et l'indice équivalent des membranes sont homogènes dans le plan et que les variations de planéité sont essentiellement dues aux déformations de la membrane, du miroir de référence et aux distorsions du front d'onde dans le montage optique.

Les mesures ont été réalisées sur deux wafers différents : le premier possède des miroirs octogonaux de 8 couches avec une contrainte résiduelle de +40 MPa, le second des miroirs octogonaux de 12 couches présentant une contrainte de +90 MPa. Les mesures de planéité ont été effectuées en redressant le profil 3D à partir d'un plan passant par des points situés à 100-200 μm des bords, et en découpant le profil de l'octogone résultant (en pointillé dans la figure 4.17a). Cette procédure a été choisie pour exclure la zone de transition entre le miroir sur silicium et la membrane, car dans cette zone, le profil de la membrane peut être erroné (variation du déphasage à la réflexion).

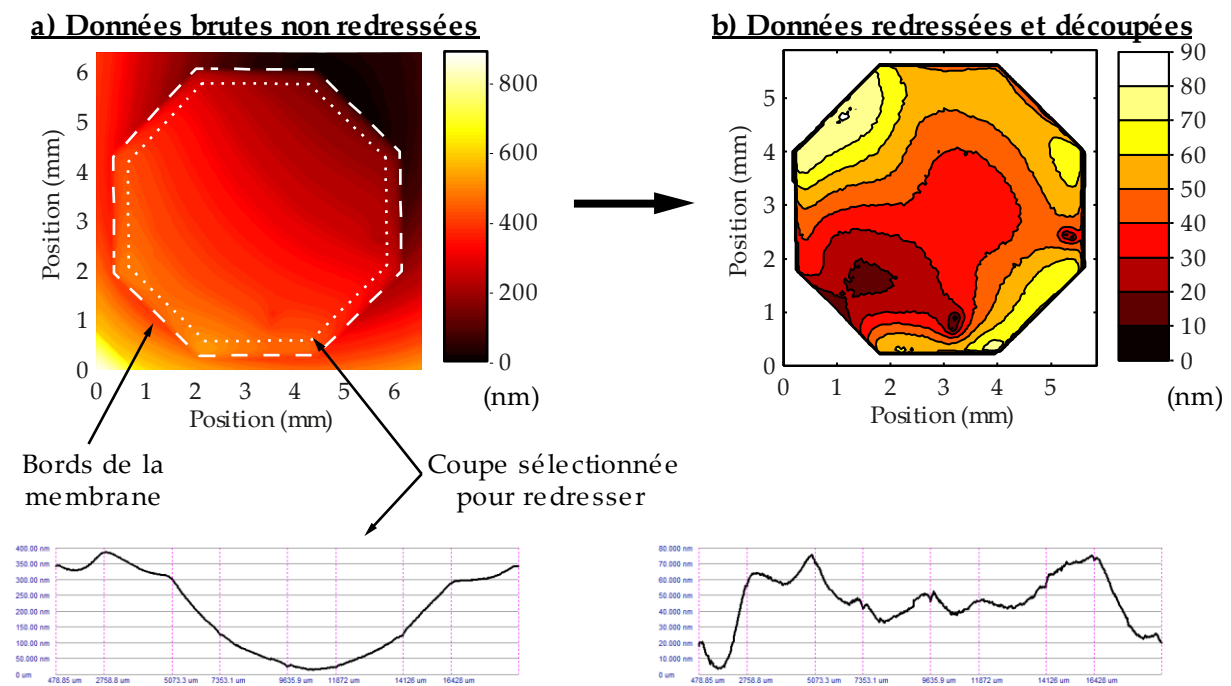


Figure 4.17 : Méthode utilisée pour redresser les mesures.

diamètre interne (mm)	1	2.7	4	5.3	5.9
planéité moyenne (nm)	15±11	78±25	109±28	124±32	163±76

Tableau 4.13 : Valeur moyenne de la planéité pic à pic et écart type mesuré sur des membranes de diamètre différent.

Le tableau 4.13 liste les valeurs de planéité pic à pic moyenne mesurées sur les deux séries de membranes (+40 MPa et +90 MPa) pour des tailles différentes. De manière générale, les résultats montrent que la reproductibilité de la planéité moyenne pic à pic est assez faible pour les membranes de grandes dimensions (5.9 mm) avec 163 ± 76 nm, car certaines

membranes ont une planéité de 100 nm, d'autres une planéité de 280 nm. Les plus petites membranes de 1 mm ont montré moins de variations avec une planéité moyenne pic à pic de 15 ± 11 nm et une excellente reproductibilité.

La raison pour laquelle une amélioration de la planéité est observée pour les membranes de faible diamètre est très simple : les déformations présentes sur les membranes proviennent quasi exclusivement des déformations du cadre d'ancrage. En effet, un simple algorithme a été en mesure de reproduire à quelques nanomètres près les déformations observées. Cet algorithme minimise la surface nécessaire pour relier tous les points fixes situés sur les bords de la membrane et fonctionne de la manière suivante :

- Imposer la hauteur des bords de la membrane à l'aide des données expérimentales. Mettre le reste de la membrane à une hauteur nulle.
- Pour chaque point composant la membrane (sauf les bords), calculer la hauteur moyenne des points entourant le point considéré, définir cette valeur moyenne comme nouvelle hauteur : $Z(i, j) = (Z(i-1, j) + Z(i+1, j) + Z(i, j-1) + Z(i, j+1))/4$.
- Calculer pour chaque point la valeur du Laplacien : $Z(i, j) = (Z(i-h, j) + Z(i+h, j) + Z(i, j-h) + Z(i, j+h) - 4Z(i, j))/h^2$.
- Si l'algorithme a convergé, la valeur maximale du Laplacien doit être proche de 0. Si elle est supérieure à une valeur limite, recommencer le calcul de la hauteur moyenne.

Cette simulation purement mathématique permet de donner des indications sur la relation entre la planéité du cadre et la planéité des membranes quelle que soit l'origine physique des défauts de planéité du cadre. Cependant, elle ne prend pas en compte l'influence directe des contraintes dans la membrane.

La figure 4.18 montre quelques exemples de simulations. La comparaison entre les simulations et les mesures a été faite en mesurant la hauteur en cinq points de la membrane (cf. figure 4.18 b et d), puis en soustrayant la valeur expérimentale de la valeur simulée. Les écarts entre la simulation et la mesure sont listés dans le tableau 4.14, ils montrent que contrairement aux membranes à +40 MPa, les membranes à +90 MPa sont suffisamment en tension pour ressembler aux simulations.

Contrainte de la membrane	+90 MPa	+40 MPa
écarts (simulation-mesure)	-13 ±3 nm	+0.2 ±9 nm

Tableau 4.14 : Différence moyenne de hauteur entre la simulation et la mesure.

En effet, pour les membranes de +90 MPa, le tableau 4.14 montre qu'il y a seulement un décalage de 13 nm entre la simulation (figure 4.18b) et la mesure (figure 4.18a), car les cinq points de mesure n'ont que ±3 nm de déviation. Il est donc possible de conclure que les déformations importantes (280 nm pic à pic) mesurées sur les membranes proviennent uniquement de la non-planéité des bords, et que la membrane se comporte comme une membrane tendue sur un cadre déformé. Il est par ailleurs possible de remarquer que la

forme octogonale n'est pas idéale, car les déformations les plus importantes sont situées dans les coins.

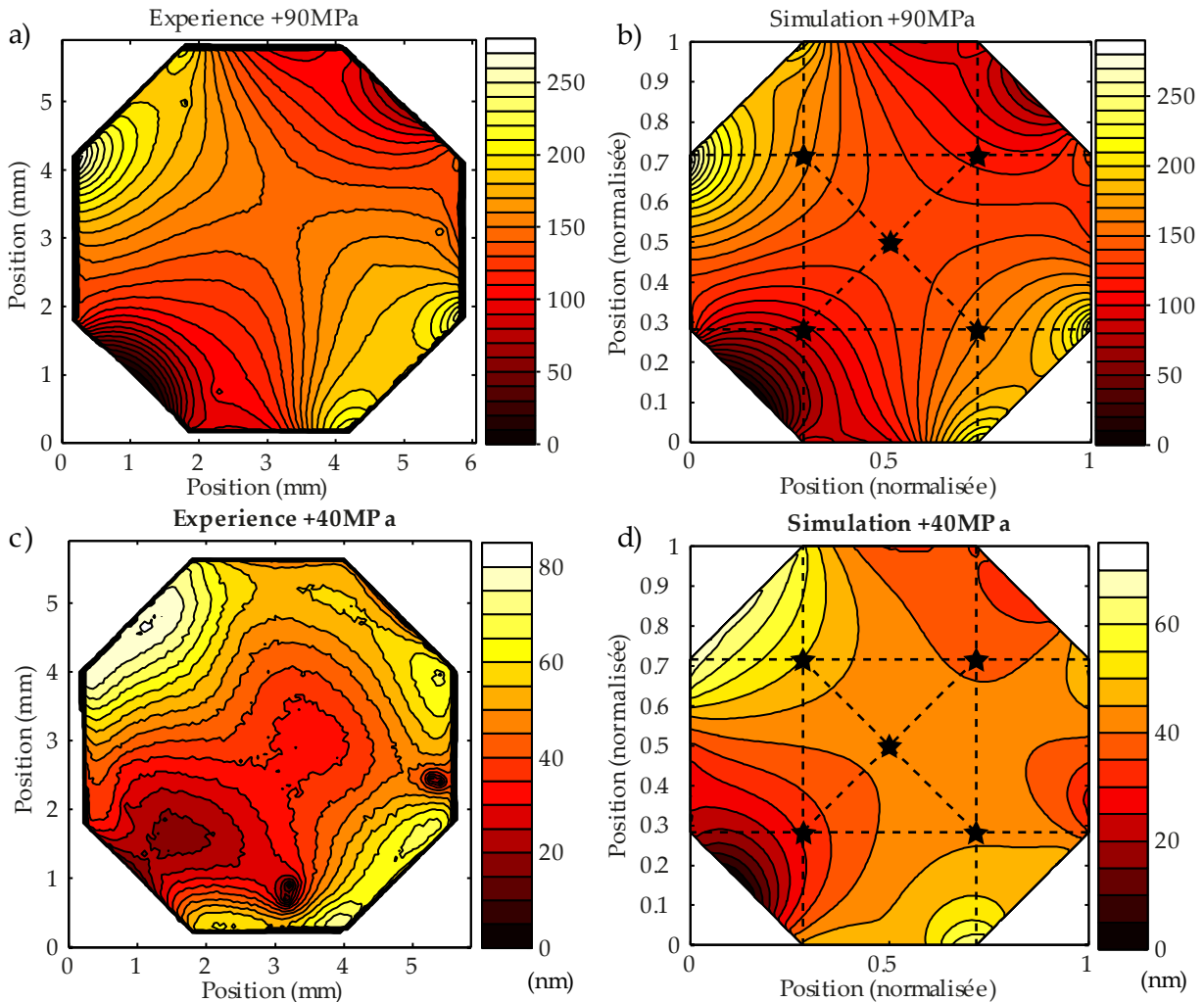


Figure 4.18 : Comparaison expérience/ simulation, avec pour a) et b) une membrane à +90 MPa, pour c) et d) une membrane à +40 MPa. Sur ces dernières, les étoiles indiquent les points de mesure utilisés pour remplir le tableau 4.14.

Par contre, pour les membranes à +40 MPa, le tableau 4.14 donne un décalage quasi nul, mais cette fois-ci les déviations de ± 9 nm sont plus importantes que précédemment. L'observation des valeurs mesurées (figure 4.18c) et des valeurs simulées (figure 4.18d) permet aussi de remarquer que la forme générale de la membrane n'est pas prévisible à l'aide de l'algorithme développé ci-dessus. En effet, la simulation n'est pas capable de reproduire la déflexion plus importante du centre de la membrane. De plus, contrairement à la membrane à +90 MPa, celle à +40 MPa n'a pas ses extrema de déformation ancrés sur les bords de la membrane, mais à environ 400 μm du bord. Il est donc possible que dans ce cas, les déformations observées proviennent en partie des déformations du bord et en partie d'une inhomogénéité des contraintes résiduelles dans le plan de la membrane.

4.6 Conclusion sur la fabrication des miroirs diélectriques

Dans ce chapitre, nous avons étudié le recuit à 700-800 °C de différents multicouches déposés par PECVD. Ces recuits nous ont permis d'obtenir des multicouches en tension de manière reproductible à condition d'avoir un recuit suffisamment long. Pour l'instant, les couches basses fréquences (LFSIO, LFSIN) sont utilisées, car elles offrent le meilleur contraste d'indice que les couches hautes fréquences (HFSIO, HFSIN), et elles ont des contraintes résiduelles raisonnables et pas trop éloignées pour des recuits à 700-800 °C.

Le plus gros problème à résoudre a été l'apparition de trous dans les multicouches lorsque une couche de nitrure est déposée en premier, et lorsque la température dépasse 550 °C. La solution la plus simple a été de déposer la silice en premier (solution compatible avec le dernier dimensionnement des miroirs). Cependant, pour les éventuels cas où du nitrure doit être déposé en premier, ce problème pourra être évité en concevant un multicouche nécessitant un recuit inférieur à 550 °C, ou en faisant un prétraitement par plasma NH₃ du silicium avant dépôt. Pendant le temps imparti pour la thèse, ces deux autres solutions n'ont pas pu être testées.

Pour l'avenir, il reste à mettre au point la prévision des températures de recuit. Les quelques essais réalisés ont donné des résultats variables, mais les plus mauvais ont été obtenus avec des recuits trop rapides. Il faudra donc refaire ces mesures avec des recuits plus longs. De même l'utilité de faire des paliers à 400 et 550 °C (températures identifiées par mesures FTIR et de contrainte résiduelle), ainsi que la reproductibilité de recuits longs restent à prouver.

Les mesures de planéité montrent en tout cas la difficulté d'obtenir une membrane plane de grande surface car les déformations présentes dans la membrane proviennent du manque de planéité du cadre en silicium sur lequel sont tendues ces dernières. Les sources de non-planéité proviennent des contraintes résiduelles, mais aussi des défauts de planéité initiale du wafer. Avant de lancer la fabrication, il faudra donc sélectionner les wafers les plus plats.

En considérant le cas le plus favorable où la courbure du wafer est régulière, en forme d'arc de cercle de rayon R et de flèche h_{waf} , on peut calculer à partir des formules (4.2) et (4.3) la flèche maximale h_{waf} pour lequel la flèche h_{min} est inférieure à 30 nm sur la longueur d'un arc de cercle l_{min} 5 mm de long (le diamètre de nos miroirs).

$$h = R \left[1 - \cos\left(\frac{l}{2R}\right) \right] \approx \frac{l^2}{8R} \quad (4.2)$$

$$h_{waf} \approx h_{min} \frac{l_{waf}^2}{l_{min}^2} \quad (4.3)$$

On trouve qu'il faudrait des wafers ayant un rayon de courbure minimum de 105 mètres soit une flèche de 7.7 μm sur 80 mm de diamètre. Or les wafer commerciaux, à cause de leur

faible épaisseur de 300-400 μm , n'ont pas souvent ces spécifications et ont toujours des formes autres qu'hémisphériques.

Les mesures interférométriques montrent aussi qu'il faudra trouver un juste milieu pour la valeur des contraintes résiduelles. Une membrane trop contrainte à l'avantage d'avoir une déformation modélisable, mais assez élevée. A l'inverse, une contrainte trop faible permet d'obtenir une meilleure planéité, mais sera moins modélisable.

Chapitre 5

Contrôle des vitesses de gravure DRIE

Dans le chapitre précédent, j'ai présenté un procédé de fabrication de miroirs sous forme de membranes et trouvé quelques solutions permettant de corriger la plupart des défauts de fabrication des membranes (comme les trous ou le manque de propreté des miroirs). Cette partie présente les tests technologiques qui ont été effectués en vue d'intégrer les miroirs membranes sur la structure mobile en silicium.

Le principal problème à résoudre est la maîtrise de la vitesse de la gravure DRIE pour pouvoir obtenir une gravure débouchante au niveau des ressorts, tout en laissant une fine couche de silicium au-dessus des miroirs et des électrodes.

5.1 Limitations de la gravure DRIE

La gravure DRIE (*Deep Reactive Ion Etching*) permet d'obtenir des flancs possédant une forte anisotropie, définie par le rapport entre la largeur et la hauteur (voir figure 5.1). Le principe utilisé par cette méthode de gravure est décrit dans la partie 2.3.2.3 p38. Les principaux défauts pouvant apparaître pendant une gravure DRIE sont listés sur la figure 5.1. Ces défauts peuvent être éliminés en choisissant avec soin les paramètres de la gravure, mais il n'est pas toujours possible d'obtenir des vitesses de gravure homogènes sur toutes les tailles de motifs sans sacrifier la vitesse de gravure et/ou la sélectivité entre la couche de masquage et le silicium. Donc les recettes de gravures sont souvent des compromis, optimisés pour une seule taille de motif, et peuvent avoir besoin d'être adaptés à chaque conception de MEMS.

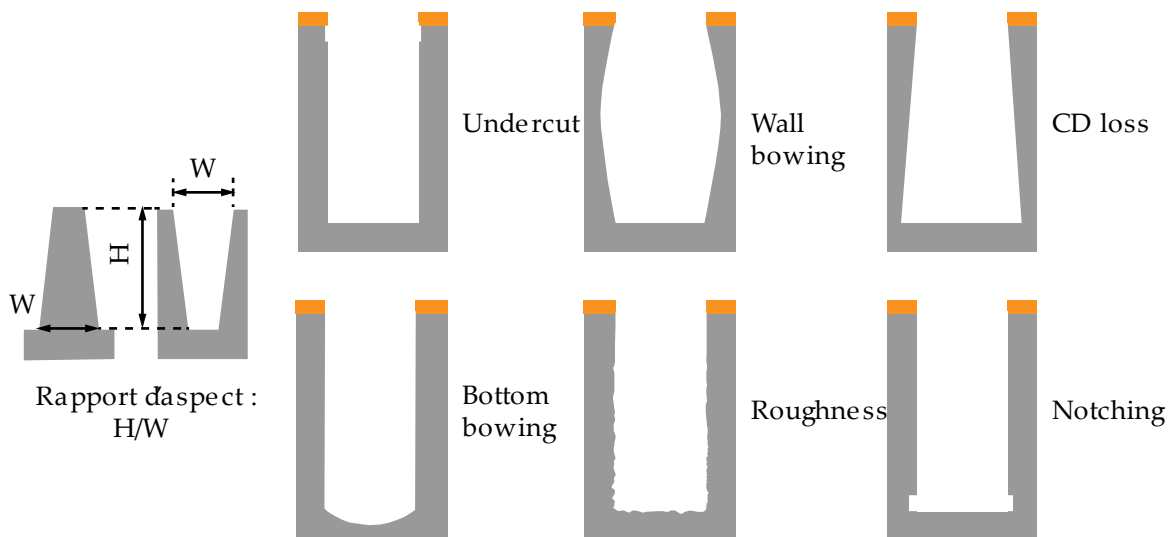


Figure 5.1 : Schéma montrant à gauche la définition de l'anisotropie, et à droite les principaux défauts inhérents à la DRIE.

Trois effets affectent l'homogénéité des vitesses de gravure : le macro loading, le micro loading et le RIE lag, ces trois effets sont définis ci-dessous :

Le macro loading (effet de chargement macroscopique) impacte l'uniformité des vitesses de gravure sur l'ensemble du wafer. Le macro loading n'a en général lieu que lorsque la surface à graver est importante et dépasse environ 30-50 % de la surface totale du wafer [Karttunen 2000]. Ces différences de vitesses de gravure proviennent d'une inhomogénéité de la composition du plasma. En effet, celle-ci dépend de la surface de silicium exposée et de la répartition des motifs à graver. Dans ce cas de figure, la vitesse de gravure sera en général plus lente au centre du wafer que sur les bords [Jensen 2005]. Mais des sources supplémentaires d'inhomogénéités de vitesse de gravure peuvent apparaître selon la disposition (dans la chambre de gravure) des arrivées de gaz et du pompage. Dans le cas des matrices de filtres Fabry Pérot étudiées par cette thèse, la surface exposée est de 7-8 %, donc cet effet est négligeable et ne sera pas pris en compte.

Le micro loading (effet de chargement microscopique) est une variation localisée de la vitesse de gravure sur des motifs qui sont pourtant de forme et de dimension similaires. Ce défaut se traduit par un ralentissement de la vitesse de gravure si les surfaces à graver sont trop importantes dans un certain rayon autour du point considéré (pouvant atteindre 4.5 mm de rayon [Jensen 2004]). Cet effet peut être présent dans notre cas, car la plupart des motifs à graver sont concentrés sur une surface faisant environ 10 mm de rayon au niveau des matrices de filtres.

Le RIE lag ou Aspect Ratio Dependant Etching (ARDE) est aussi un phénomène local, mais diffère du micro loading : il dépend des dimensions, de la forme, et du rapport d'aspect des motifs. De manière générale, il se traduit par une vitesse de gravure plus faible dans les petites ouvertures, et provient de la limitation dans celles-ci de la diffusion des réactifs et des produits de gravure.

Le RIE Lag est le phénomène le plus critique pour la fabrication des miroirs mobiles des filtres Fabry Pérot, car la surface à graver comporte des ouvertures d'environ 5 mm de diamètre à proximité de tranchées de 100 μm de large. Or la figure 5.2 montre que dans des conditions de gravure DRIE standard, l'ouverture de 5 mm est gravée plus rapidement que les tranchées de 100 μm . Dans notre cas, pour éviter d'endommager les miroirs, il faut inverser cette tendance.

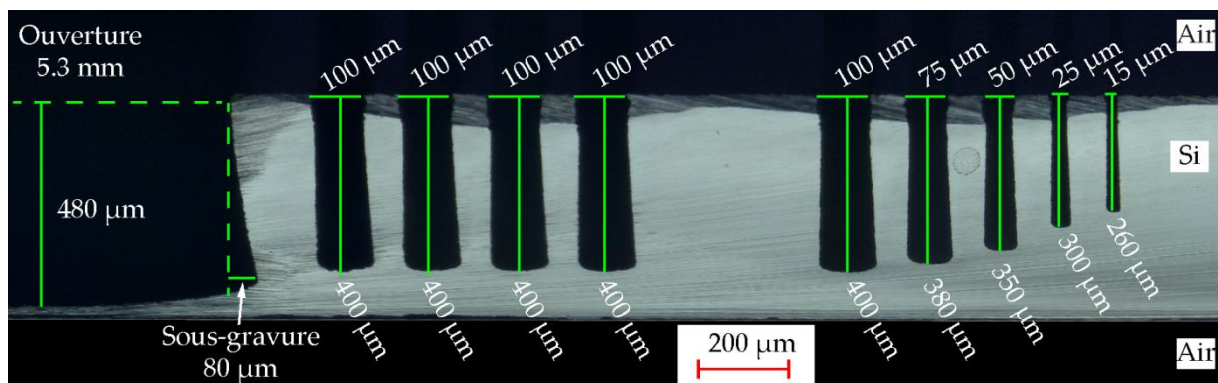


Figure 5.2 : Vue en coupe montrant la profondeur gravée pour différentes tailles de motifs. Plusieurs défauts de gravure sont visibles : les fonds de gravure sont arrondis, les flancs ne sont pas complètement verticaux (voir sous gravure de 80 μm la grande ouverture à gauche) ; et enfin, il y a une diminution de la profondeur gravée avec la taille de l'ouverture (RIE Lag).

Un second défaut de gravure est visible sur la figure 5.2 : les flancs de gravure de la grande ouverture ne sont pas verticaux. En principe ce défaut peut être corrigé en modifiant la recette de gravure [Jansen 1995 ; Jansen 1996]. Mais nous verrons plus loin que cela ne sera pas nécessaire.

Tous ces défauts sont très fréquents et donc plusieurs solutions (couramment employées) existent, mais elles nécessitent toutes de prévoir à l'avance leur intégration dans le procédé de fabrication. Ci-dessous, j'expose les différentes solutions possibles, et j'explique les raisons de notre choix.

5.2 Choix de la méthode de contrôle des vitesses de gravure DRIE

Plusieurs méthodes de contrôle des vitesses de gravure ont été envisagées : l'utilisation d'une couche d'arrêt (figure 5.3a) ou de retard (figure 5.3c), l'utilisation de wafers de type SOI (figure 5.3b), ou encore l'utilisation de motifs de remplissage temporaires (figure 5.3d).

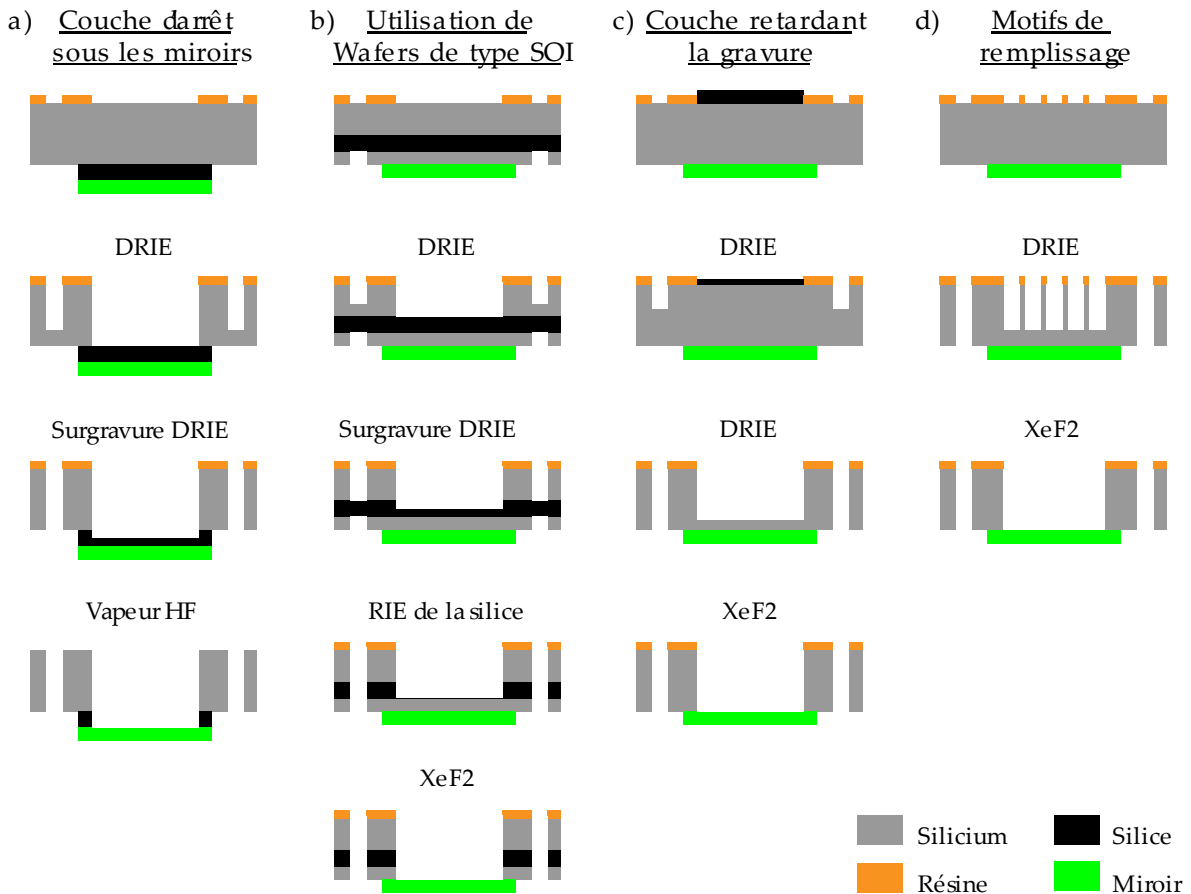


Figure 5.3 : Schémas montrant différentes méthodes permettant de contrôler les vitesses de gravure DRIE.

Couche d'arrêt

Pour s'affranchir du RIE lag, l'utilisation d'une couche d'arrêt en silice (figure 5.3a) est la méthode la plus utilisée. Elle repose sur la sélectivité élevée de la gravure DRIE du silicium par rapport à la silice. Cette méthode a été utilisée par D. Brent Mott et al [Mott 2003 ; Palmer 2006] pour fabriquer un filtre Fabry Pérot (voir figure 2.19 p39). Leur procédé de fabrication (figure 5.3a) utilise une couche d'arrêt en silice, avec par-dessus, une couche en nitrure de silicium. A la fin de la gravure DRIE, une gravure sélective (utilisant des vapeurs HF) retire la silice, laissant ainsi la membrane en nitrure de silicium sur laquelle est ensuite déposé le miroir multicouche.

Cette solution n'a pas été retenue, car notre bâti de gravure requiert l'assemblage d'un wafer support pour pouvoir faire des gravures traversantes. Or, en fin de gravure, le retrait du

wafer support présente un risque non négligeable de rupture de la membrane, car à cette étape, la membrane sera complètement libérée.

Utilisation de wafers SOI

La seconde méthode permettant de s'affranchir du RIE lag consiste à utiliser la fine couche de silice enterrée d'un wafer de type SOI comme couche d'arrêt (figure 5.3b). C'est en apparence la solution la plus simple : au niveau des miroirs, la silice enterrée empêchera la gravure DRIE de se poursuivre, puis la fine couche de silicium restante (10-30 μm d'épaisseur) permettra de renforcer le miroir pendant le décollement du wafer support.

Cependant, cette solution n'a pas été retenue, car à la fin de la fabrication du MOEMS, de la silice enterrée sera présente sur différentes parties de la structure mobile (cadre et ressorts), et les contraintes compressives de cette silice auront pour inconvénient de déformer la structure.

Couche de retard

Cette solution consiste à utiliser une fine couche (silice, nitrure, résine, ou métal) pour ralentir la vitesse de gravure initiale (figure 5.3c). Elle a été utilisée par plusieurs auteurs [Kundu 2012 ; Laszczyk 2009 ; Sanders 2009] pour fabriquer une plateforme MOEMS, une membrane tendue sur un cadre rigide, et un micro-miroir pour projecteur par balayage.

Cette solution aurait pu être utilisée, car elle offre l'avantage de permettre un ajustement de la profondeur gravée par simple modification de l'épaisseur de la couche de retard. Cependant cette technique rajoute des étapes de fabrication supplémentaires, et la structuration de la couche de retard ne doit surtout pas endommager le multicouche. En effet, avec notre équipement, nous pourrions seulement utiliser une couche de silice ou de nitrure (car les masques métalliques sont interdits). Or, pour structurer de la silice ou du nitrure, il est préférable d'utiliser une gravure au BHF (car elle offre une sélectivité élevée par rapport au silicium), mais cette méthode de gravure risque d'endommager les miroirs.

L'utilisation d'une couche de retard en résine permet de ne pas utiliser du BHF, mais il faut utiliser plusieurs résines différentes pour que les enrésinements successifs ne dissolvent pas la couche de résine déjà structurée. De plus, à cause de la présence de motifs à la surface du wafer, les enrésinements multiples par spin coating posent des problèmes d'homogénéité d'épaisseurs à cause de la formation de stries. Ainsi, à cause des variations d'épaisseur de la résine, le contrôle de la profondeur gravée sera difficile à garantir.

Une autre manière d'utiliser les couches de retard est de superposer des couches de masquage différentes, et à successivement les retirer (avec une gravure sélective) après chaque niveau de gravure DRIE. Cette technique a été testée par exemple à l'institut FEMTO-ST [Thevenet 2005] pour des essais de réalisation d'actionneurs de miroirs mobiles. La technique est intéressante, mais elle nécessite plusieurs lithographies sur des surfaces structurées, avec tous les inconvénients associés, et n'est a priori utilisable que pour des motifs d'assez grandes tailles.

Motifs de remplissage

Finally, the last solution allowing to suppress the RIE lag effect consists in using temporary filling motifs (figure 5.3d). This is the solution that has been retained for this thesis, as it presents the advantage of minimizing the number of supplementary steps. In effect, it suffices to make a single mask in resin, then a DRIE etching.

It presents however generally three inconveniences: the necessity to eliminate afterwards the temporary motifs; the high roughness of the bottom of the openings where the etching rate has been slowed; and finally the necessity to modify the mask design as a function of the depths to be etched.

This etching rate control procedure has already been used by Hsu et al. [Hsu 2008] for the fabrication of a micro-mirror possessing multi-level structures. In this article, the authors used an anisotropic etching, then a bath in TMAH to suppress the temporary motifs and to smooth the roughness, but TMAH requires having a mask in nitride, which can become difficult to remove.

In the context of the fabrication of the Fabry Pèrot filter matrix considered in this thesis, two of the three inconveniences of the filling motifs do not pose a problem. In effect, we do not need smooth etching bottoms, as the thin silicon layer situated below the mirrors will in any case be etched by XeF_2 . Moreover, the use of this isotropic etching will also allow to detach the temporary motifs. It remains therefore only one problem to solve: the dimensioning of the filling motifs.

5.2.1 Conclusion

In conclusion, among the four etching rate control methods examined, the use of temporary motifs seems to be the best solution. In effect, it is the least constraining from a technological point of view, as it does not require the use of certain materials, or of dangerous etchings for the mirrors. On the other hand, one must be careful about the dimensioning of the filling motifs, as this method has a major inconvenience: it requires a new mask each time one wishes to modify the etching rate. This is why, to calibrate the etching rates as a function of the filling motif size, we have designed a test mask for the filling motifs. The design of this test mask is described in the following part.

5.3 Masque de test des motifs de remplissage

Pour mettre au point la méthode de contrôle des vitesses de gravures utilisant le RIE lag, nous avons testé différents types de motifs, le but étant de trouver la taille et la forme à donner aux motifs pour pouvoir d'une part réduire la vitesse de gravure des grandes ouvertures, et d'autre part facilement retirer les motifs de remplissage en fin de gravure. Ce masque a été conçu pour des membranes octogonales, car il a été dessiné au moment où nous envisagions de fabriquer la version sur SOI (cf. annexe E p209).

5.3.1 Dessin du masque

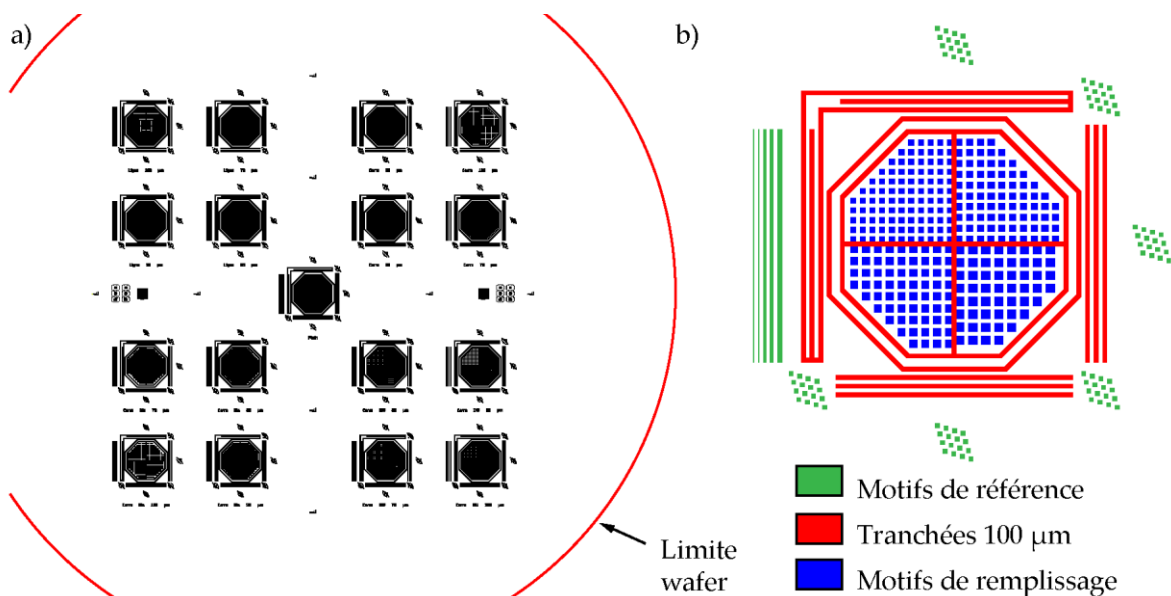


Figure 5.4 : a) Vue d'ensemble du masque de test des motifs de remplissage (parties à graver en noir).

b) Agrandissement de l'une des structures de test utilisant des grilles comme motif de remplissage. Les parties à graver sont sur le même niveau de photolithographie, mais sont colorées différemment selon leur fonction.

Le masque comporte en tout 17 structures dont la géométrie générale est présentée dans la figure 5.4a. Chaque structure de test est composée des éléments suivants :

- des tranchées de 100 μm (en rouge sur la figure 5.4b) pour simuler des tranchées d'isolation électrique et la délimitation des ressorts ;
- des motifs pour étalonner les vitesses de gravure sur l'ensemble du wafer (en vert sur la figure 5.4b). Ils sont constitués de tranchées de largeurs 15, 25, 50, 75 et 100 μm, ainsi que d'ouvertures carrées de 100 μm de côté situées en périphérie de la structure de test ;
- des ouvertures octogonales remplies de motifs de remplissage (en bleu sur la figure 5.4b). Chaque structure de test a été divisée en quatre tailles de motifs de remplissage. Le masque comprend deux types de motifs de remplissage : des grilles, et des piliers.

Le masque a été conçu pour minimiser les effets du macro-loading (avec une faible surface de 6-7 % de silicium exposé), et du micro-loading (en espaçant toutes les structures de tests de plus de 4,5 mm).

5.3.2 Résultats des tests de gravure

Les paramètres utilisés pour la gravure DRIE sont listés dans le tableau 5.1.

	Gravure	passivation
durée cycle (s)	9.5	3
pression (mTorr)	~26	~12
Flux gaz (sccm)	SF ₆ (450), O ₂ (45)	C ₄ F ₈ (200)
Puissance RF bobine (W)	2200	1500
Puissance RF échantillon (W)	40	20
Electroaimant (A)	3.5	0

Tableau 5.1 : Paramètres utilisé pour les gravures profondes avec la DRIE ICP de la société STS.

Tous les résultats décrits ci-après ont été mesurés sur un wafer pour lequel les tranchées de 100 μm de large ont été gravées avec 400 μm de profondeur, car ces conditions sont très proches de nos besoins pour la fabrication de la matrice de filtres. Après découpe des échantillons à la scie diamantée, les flancs des gravures ont été observés au microscope optique.

5.3.2.1 Homogénéité de la vitesse de gravure

Le tableau 5.2 présente l'homogénéité de la vitesse de gravure sur l'ensemble du wafer de 100 mm de diamètre, cette vitesse s'apprécie en mesurant les profondeurs de gravures obtenues. Elles ont été mesurées sur chacune des tranchées de largeurs variables (dessinées en vert sur la figure 5.4b).

Largeur tranchées (μm)	Profondeur moyenne (μm)	Diminution relative de la profondeur (%)
15	261 \pm 4	34,1
25	296 \pm 3	25,2
50	349 \pm 2	11,9
75	378 \pm 3	4,7
100	396 \pm 4	0

Tableau 5.2 : Comparaison des profondeurs de gravure obtenues sur les motifs de référence composant chacune des structures de test.

L'homogénéité de la gravure sur l'ensemble du wafer est très bonne (cf. tableau 5.2) avec des écarts de seulement ± 2 à ± 4 μm (± 1 à $\pm 1,5$ %) sur une largeur de tranchée donnée. Les faibles variations de profondeur gravée sur l'ensemble du wafer confirment l'absence de macro-loading. Ces mesures permettent d'évaluer qu'une marge de sécurité de 10 μm doit être prise lors du dessin du masque de gravure final.

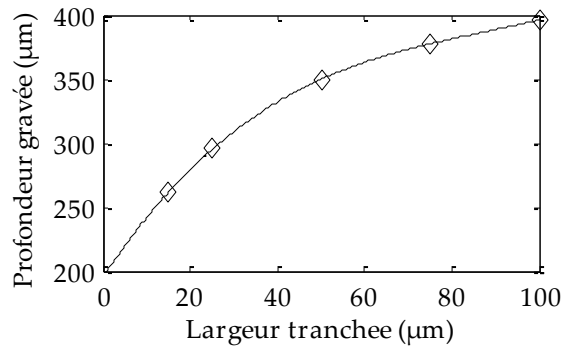


Figure 5.5 : Tracé de la vitesse de gravure en fonction de la largeur des tranchées.

Par contre, ces mesures montrent que l'effet du RIE lag est très important (cf. figure 5.5). Par exemple, une tranchée de 15 µm de large a une profondeur qui est 34 % plus faible que pour une tranchée de 100 µm de large (cf. tableau 5.2). Il est toutefois intéressant de noter que l'effet du RIE lag n'est important que pour des motifs de petites tailles, au-delà d'une centaine de microns, le RIE lag tend à disparaître.

5.3.2.2 Variation des vitesses de gravure en fonction du motif de remplissage

La figure 5.6 montre quelques vues en coupe au niveau des motifs de remplissage. Elle montre que les motifs de remplissage sont très efficaces pour ralentir la vitesse de gravure de manière homogène sur toute la largeur de l'ouverture. De même, le problème d'inclinaison des flancs visible sur la figure 5.6a a été résolu par l'utilisation des motifs de remplissage, qui ont permis de redresser les flancs des grosses ouvertures.

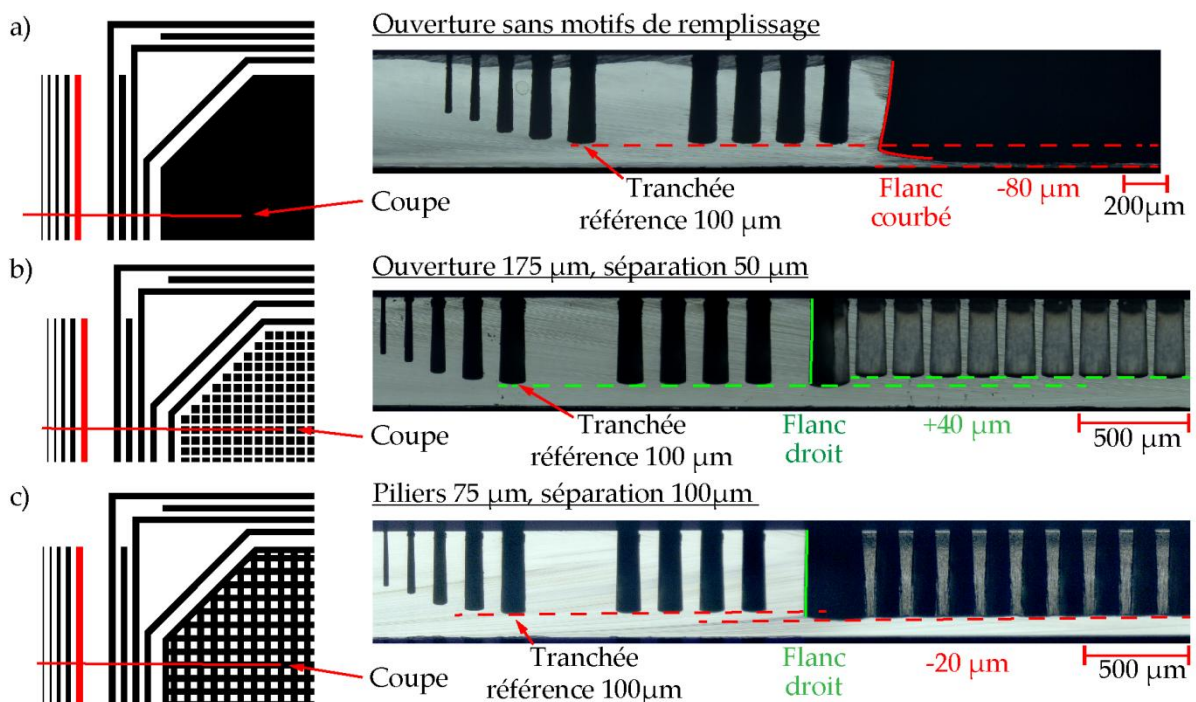


Figure 5.6 : Vue en coupe d'échantillons de gravure. a) Sans motifs de remplissage. b) Motifs de remplissage sous forme de grilles. c) Motifs de remplissage sous forme de piliers.

Pour la fabrication de la matrice de filtres, les wafers auront une épaisseur de 400 μm . Nous avons besoin de graver de part en part des tranchées de 100 μm de large tout en conservant une épaisseur de 10-20 μm de silicium dans des ouvertures de ~ 5 mm de diamètre correspondant aux membranes. Ainsi, les motifs de remplissage doivent être au minimum capables de réduire la vitesse de gravure de 2.5 à 5 %.

Les résultats des variations de vitesse de gravure sont visibles dans la figure 5.7 et la figure 5.8, ces deux figures sont examinées dans les deux parties qui suivent. Mais tout d'abord, remarquons que les deux types de motifs de remplissage ont été peu affectés par du micro-loading. En effet, pour une dimension constante d'ouverture (figure 5.8a), ou pour un écart entre piliers identique (figure 5.7a), la profondeur gravée est quasiment constante malgré une variation de 20 à 30 % de la surface gravée au niveau des motifs de remplissage (figure 5.7b et figure 5.8b). Cela signifie que le ralentissement des vitesses de gravure provient presque uniquement du RIE lag, et donc que les valeurs mesurées lors de ce test technologique devraient être suffisamment fiables pour nous servir à dessiner le masque final de gravure des filtres.

a) Motifs de remplissage sous forme de piliers

Les résultats obtenus pour les motifs de remplissages sous forme de piliers sont montrés dans la figure 5.7a où est tracée la profondeur de gravure normalisée (par rapport aux tranchées de 100 μm de large) en fonction de la taille et de l'écart des piliers. La figure 5.7b représente le pourcentage de surface gravée en fonction de la taille et de l'écart des piliers.

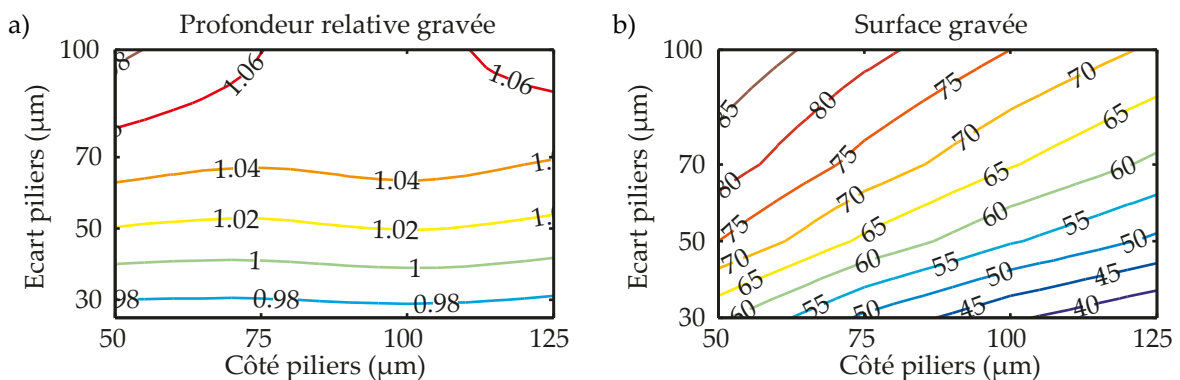


Figure 5.7 : a) Profondeur relative gravée des motifs de remplissage en piliers, calculée par rapport aux tranchées de 100 μm de largeur.

b) Pourcentage de surface gravée au niveau des motifs de remplissage en fonction de la taille et de l'espacement des piliers.

La figure 5.7a permet de remarquer que la vitesse de gravure dépend de l'écart entre piliers. L'avantage des piliers est leur facilité à paver tous types de surfaces.

Cependant, un premier inconvénient de ces motifs de remplissage est que pour obtenir une vitesse de gravure inférieure à celle des tranchées de 100 μm , il faut avoir un espacement entre piliers inférieur à 30 μm . Or, nous n'avons pas dessiné de piliers espacés à moins de 30 μm , il nous est donc difficile d'extrapoler et de connaître à l'avance la vitesse de gravure que l'on pourrait obtenir. En effet, sur seulement 30 μm de variation d'écart entre piliers,

deux scénarios sont envisageables : soit la baisse de vitesse de gravure sera faible (quelques %), soit elle sera brutale auquel cas le contrôle des vitesses de gravure deviendra délicat (car la vitesse de gravure dépendra fortement de l'écart).

Un deuxième inconvénient de l'utilisation de piliers, s'ils se détachent du wafer pendant la gravure, est le risque de perturber la gravure ou/et la difficulté de les éliminer s'ils se glissent dans d'autres ouvertures.

Donc, dans notre cas, cette solution n'est donc pas complètement satisfaisante. Mais si les tranchées à graver avaient été plus larges, nous aurions sans doute pu utiliser ces motifs de remplissage.

b) Motifs de remplissage sous forme de grilles

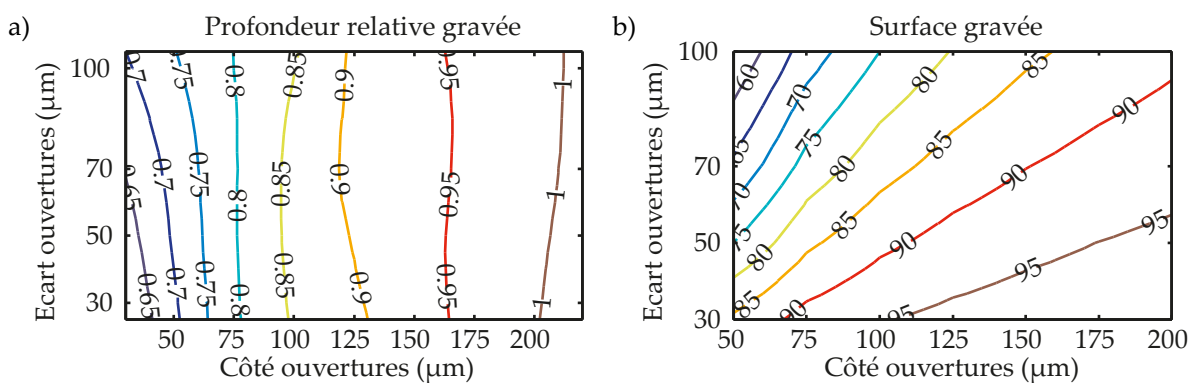


Figure 5.8 : a) Profondeur relative gravée des grilles, calculée par rapport aux tranchées de 100 µm de largeur.

b) Proportion de surface gravée au niveau des motifs de remplissage en fonction de la taille et de l'espacement des ouvertures de la grille.

La figure 5.8a montre l'influence de la géométrie de la grille sur la variation relative de profondeur gravée. Cette fois ci, c'est la largeur des ouvertures qui influence la vitesse de gravure.

A l'inverse des piliers, les motifs sous forme de grille ont permis de ralentir de manière significative la vitesse de gravure. Par exemple, une grille ayant des ouvertures de 50 µm de côté permet d'obtenir une vitesse de gravure 30 % plus lente que dans les tranchées de 100 µm de large. Par ailleurs, ce type de motif de remplissage permet même d'envisager de réduire la largeur des tranchées, car d'après le tableau 5.2 (p146), et la figure 5.8a, des ouvertures de 50 µm de côté sont gravées 5 % moins vite que des tranchées de 25 µm de large. De plus, comparés aux piliers, les motifs de remplissage sous forme de grilles ont l'avantage d'être d'une seule pièce, et les grilles ne gêneront pas la gravure même si elles sont entièrement détachées.

5.3.3 Conclusion

Ce test technologique a permis de démontrer que l'effet de macro-loading peut être négligé, car l'homogénéité de la vitesse de gravure DRIE sur l'ensemble du wafer est de $\pm 4 \mu\text{m}$ pour $400 \mu\text{m}$ de profondeur gravée au niveau de tranchées de $100 \mu\text{m}$ de large. Pour compenser les différences de vitesses de gravure, il faudra néanmoins prévoir une marge de sécurité de $10 \mu\text{m}$.

Nous avons testé deux types de motifs de remplissage : des piliers et des grilles. De manière générale, malgré des surfaces importantes de gravure, les mesures effectuées sur les deux types de motifs de remplissage semblent peu affectées par le micro loading. Ainsi, ces mesures devraient être suffisamment fiables pour nous servir à dessiner le masque final de gravure des filtres. Chacun des motifs de remplissage a ses avantages et inconvénients :

Ainsi, les piliers ont pour avantage d'être extrêmement simples à utiliser car ils peuvent aisément paver toutes formes d'ouvertures. Mais les variations de vitesse de gravure sont très faibles et insuffisantes pour notre application.

A l'inverse, les grilles permettent d'ajuster les vitesses de gravure sur une très large gamme. Les variations sont si importantes que nous pourrions sans doute nous permettre dans une seconde version du MOEMS de réduire la largeur des tranchées de 100 à $30 \mu\text{m}$, ce qui nous fournira un gain de place important. D'autre part, comparées aux piliers, les grilles ont pour avantage d'être d'une seule pièce, elles seront donc plus facilement éliminables que les piliers.

C'est pourquoi nous avons décidé d'utiliser des grilles comme motifs de remplissage. Les parties suivantes sont destinées à affiner la procédure de contrôle de la gravure. J'y présenterai le dimensionnement des motifs de remplissage, ainsi que différentes méthodes de pavage.

5.4 Optimisation des motifs de remplissage

5.4.1 Motifs de remplissage détachables en fin de gravure

Pour la première version des masques de fabrication du MOEMS, nous avons envisagé de dessiner des motifs de remplissage qui se détachent tous seuls en fin de gravure DRIE. Dans notre procédé de fabrication, l'intérêt d'avoir des motifs de remplissage qui se détachent tout seul est facultatif. En effet une gravure XeF_2 sera utilisée pour retirer la fine couche de silicium au dessus des miroirs, et de plus sous les électrodes, le retrait des motifs temporaires n'allégera pas suffisamment la structure pour en augmenter de manière significative les fréquences de résonance. Cependant, montrer que ce genre de technique est faisable aura pour avantage de rendre l'utilisation de motifs de remplissage polyvalente, car il ne sera pas nécessaire d'utiliser une gravure XeF_2 ou au TMAH pour détacher les motifs temporaires.

Le détachement des motifs de remplissage a été envisagé après un examen attentif des échantillons de la partie précédente : il repose sur un faible défaut d'anisotropie de la recette de gravure, qui se traduit par un élargissement des ouvertures au fond de la gravure DRIE (cf. figure 5.9). Par contre, comme cela est visible sur la figure 5.9, le détachement de la grille dessinée sur les masques de test ne se fait pas de manière homogène : il commence au centre des parois et se termine dans le coin des ouvertures. Cette inhomogénéité dans le détachement de la grille peut devenir gênante, car lors d'une gravure DRIE, la vitesse de gravure augmente lorsque des ouvertures voisines coalescent [Kiihamaki 1999]. Ce phénomène n'a pas été pris en compte par les tests de gravure ; donc pour minimiser la durée pendant laquelle la vitesse de gravure augmente, il faut tenter d'homogénéiser au maximum le détachement des grilles.

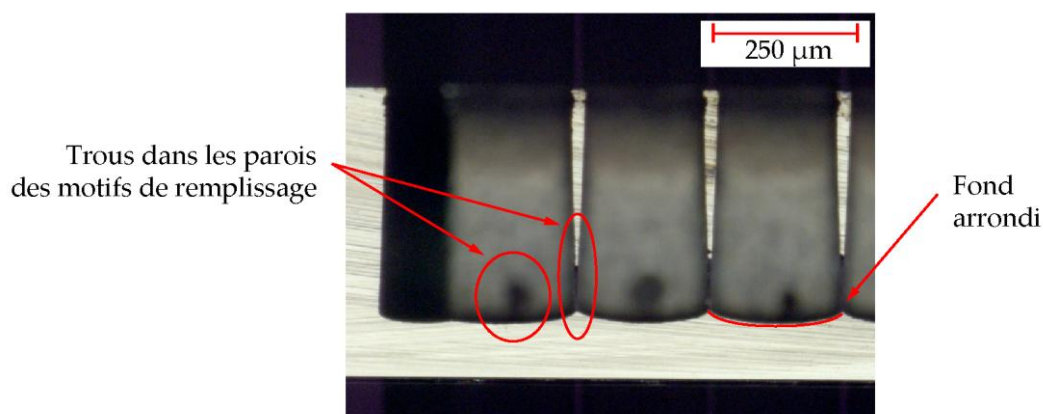


Figure 5.9 : Vue en coupe acquise avec un microscope optique montrant la présence de trous créés par la sous-gravure des parois du motif de remplissage en forme de grille.

Nous avons supposé qu'une partie de l'inhomogénéité de la sous-gravure provient des angles à 90° dans les coins des ouvertures carrées, nous avons donc décidé d'utiliser des ouvertures hexagonales qui ont, dans les coins, des angles plus élevés (120°). La forme finale

du motif de remplissage retenue est visible dans la figure 5.10a, pour légèrement diminuer la quantité de silicium à sous-graver dans les coins, une petite ouverture hexagonale supplémentaire a été rajoutée. Cependant, lors du test technologique de la partie 5.3.2.2 (p. 147), nous n'avons pas testé la gravure d'ouvertures hexagonales. Heureusement, en observant les résultats expérimentaux de Kiihamäki et al. [Kiihamaki 1999], nous nous sommes rendu compte que dans cette publication, les ouvertures circulaires et carrées de même surface sont gravées à la même vitesse. Donc, les dimensions du nouveau motif de remplissage ont été déterminées en supposant qu'à surface égale, une ouverture hexagonale sera gravée à la même vitesse qu'une ouverture carrée.

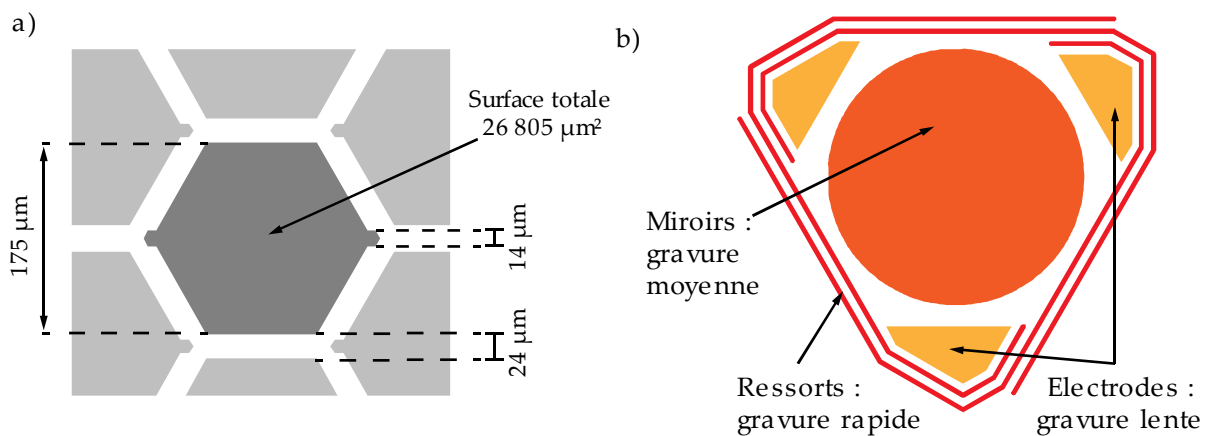


Figure 5.10 : a) Dimensions et forme du motif de remplissage utilisé sous les miroirs dans les masques finaux de la matrice de filtres.

b) Schéma montrant les zones à graver pour fabriquer le miroir mobile. Les trois zones devant avoir des vitesses de gravure différentes (miroir, électrodes, ressorts) sont représentées par une couleur différente.

	Épaisseur restante de silicium (µm)	Surface motif de remplissage (µm ²)	Profondeur séparation grille (µm)	Ecart entre motifs (µm)
Miroir	20	26 805	320	24
Electrode	70	10 060	265	20

Tableau 5.3 : Dimension des motifs de remplissage utilisés sous les électrodes et sous les miroirs.

Les dimensions des motifs de remplissage sont listées dans le tableau 5.3, elles ont été sélectionnées pour obtenir trois vitesses de gravure différentes : lente sous les électrodes, moyenne au niveau des miroirs, et rapide au niveau des tranchées (cf. figure 5.10b). De même, les épaisseurs des parois ont été déterminées de manière à obtenir un détachement des grilles après 265 µm de gravure au niveau des électrodes, et après 320 µm de gravure au niveau des miroirs. La première version du masque utilisée pour la fabrication du MOEMS a ensuite été dessinée et commandée pour faire les premiers essais de gravure.

Deux premiers essais de gravure DRIE sur les masques ainsi dessinés, ont permis de confirmer que la vitesse de gravure est plus élevée au niveau des ressorts qu'au niveau des miroirs et des électrodes. Cependant, la sous gravure des grilles n'a pas été complète, car les

grilles visibles sur la figure 5.11b ont nécessité un petit coup de pince pour achever de les détacher du wafer.

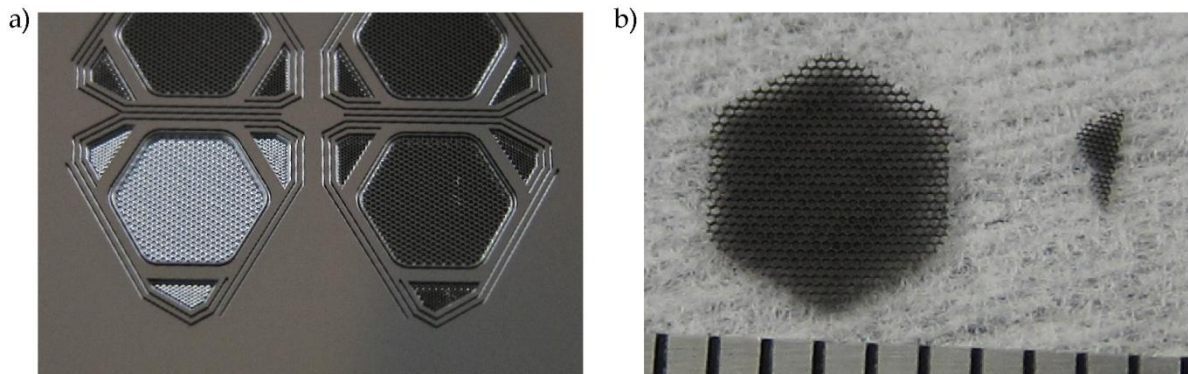


Figure 5.11 : a) Photographie montrant le fond de gravure de l'une des structures pour laquelle les motifs de remplissage ont été détachés.

b) Photographie montrant les grilles détachées.

Autre souci, une erreur dans le dessin des masques nous a donné une vitesse de gravure plus élevée que désirée sur la périphérie des grilles, car la tranchée détournant les motifs est de $100\ \mu\text{m}$ de large (même largeur que les ressorts) au lieu de $75\ \mu\text{m}$ (cf. figure 5.12). De même, l'utilisation de motifs réguliers nous a forcé à laisser certains des motifs ouverts, ce qui a pu accélérer un peu plus la vitesse de gravure. Une modification du dessin des masques sera nécessaire, mais il faudra au préalable observer une vue en coupe des gravures déjà réalisées pour rechercher si il y a eu du micro-loading et pour mesurer les vitesses de gravure.

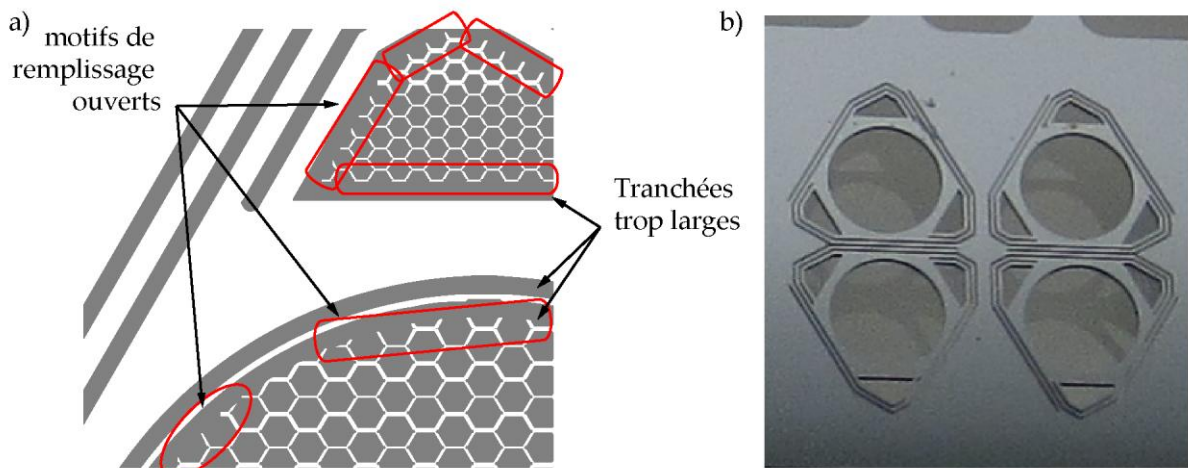


Figure 5.12 : a) Deux défauts dans les dessins des motifs de remplissage : certaines mailles des grilles ont été ouvertes pour pouvoir paver toute les surfaces ; les tranchées délimitant les motifs de remplissage sont trop larges : $100\ \mu\text{m}$ au lieu de $75\ \mu\text{m}$.

b) Bien que les vitesses de gravure soient plus lentes au niveau des électrodes et des miroirs, les tranchées délimitant les motifs de remplissage sont aussi larges que les tranchées délimitant la structure mobile. Les pourtours des motifs de remplissage ont donc été gravés à la même vitesse que les tranchées, ce qui après nettoyage de la résine donne des cadres vides sans électrodes et sans miroirs.

5.4.2 Nouveau dessin des motifs de remplissage

Pour le nouveau dessin des masques, nous n'envisageons pas d'utiliser des motifs qui soient détachables, car bien que potentiellement réalisables, ils nécessiteront des tests plus poussés. D'autre part, de manière générale, les motifs de remplissage composés d'hexagones réguliers ne sont pas un choix idéal, car ils posent des problèmes de pavage. D'autres styles de pavages, plus simples à utiliser, seront donc employés. Dans les deux parties qui suivent, je présenterai ces nouveaux types de motifs de remplissage, mais l'accent sera mis sur la nouvelle forme des motifs de remplissage, et pas sur leurs dimensionnements.

5.4.2.1 Utilisation de tranchées

L'utilisation de tranchées est une solution a priori assez simple. En effet, les tranchées peuvent facilement être dimensionnées (à l'aide de la figure 5.5 p147) pour paver les ouvertures hexagonales (figure 5.13a) ou circulaires des miroirs (figure 5.13b).

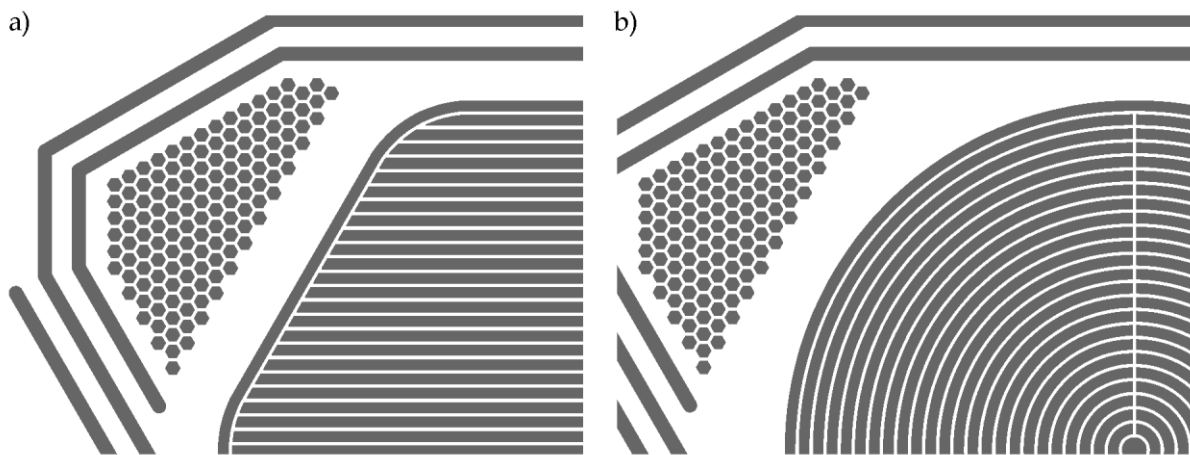


Figure 5.13 : a) Ouverture hexagonale tapissée par des lignes de 76-77 μm séparées de 30 μm .
 b) Ouverture circulaire tapissée avec des cercles concentriques de 75 μm de large séparés de 30 μm .
 Une tranchée de 30 μm de large connecte toutes les parois pour donner une grille. Le centre du cercle est occupé par une ouverture de 90 μm de rayon pour obtenir la même vitesse de gravure qu'au niveau des tranchées.

Notons que l'utilisation de tranchées n'est simple que pour de grandes ouvertures. En effet, si la tranchée est trop courte, sa vitesse de gravure devient dépendante du rapport longueur/largeur de la tranchée. Par exemple, les travaux de Kiihamäki et al. [Kiihamaki 1999] indiquent que pour obtenir une vitesse de gravure similaire dans des tranchées de longueurs différentes, il faut que la longueur des tranchées soit 5 à 10 fois plus grande que leur largeur. Ainsi, le dessin de motifs de remplissage à l'aide des tranchées peut devenir assez difficile sur de petites surfaces ou pour des géométries complexes, car dans ces cas, des tranchées de largeur variable peuvent devenir nécessaires.

5.4.2.2 Utilisation de polygones irréguliers

A l'inverse des motifs sous forme de tranchées, les polygones irréguliers permettent de paver n'importe quelle surface. A ma connaissance, la meilleure solution pour paver une forme quelconque avec des motifs de surface similaires est d'utiliser une méthode de maillage appelé « Centroidal Voronoi Tessellation » (CVT). Cette méthode de maillage repose sur l'utilisation de diagrammes de Voronoi. Par définition, les diagrammes de Voronoi sont composés de polygones, obtenus à partir d'un nuage de points en traçant la médiatrice entre un point et ses premiers voisins, c'est l'intersection des médiatrices qui donne une cellule de Voronoi.

Il existe plusieurs méthodes donnant des CVT [Du 1999], dans notre cas, l'algorithme de Lloyd a été utilisé, le principe de fonctionnement de cet algorithme est le suivant :

0. répartir N points au hasard sur la surface à paver (cf. figure 5.14a) ;
1. tracer le diagramme de Voronoi du nuage de points ;
2. calculer le barycentre de chaque cellule de Voronoi, puis déplacer chacun des points sur le barycentre de sa cellule de Voronoi ;
3. si les cellules de Voronoi ont une surface trop éloignée de la surface cible, recommencer depuis l'étape N°1.

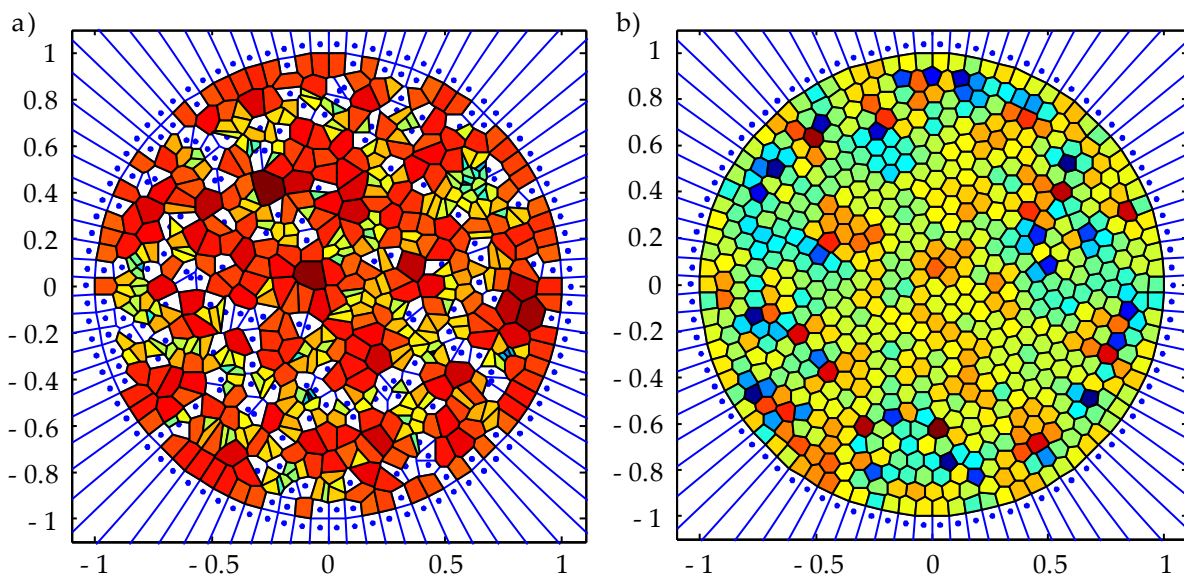


Figure 5.14 : a) Diagramme de Voronoi montrant la répartition aléatoire des points sur un disque avant la première optimisation. Les polygones non colorés sont dans les limites de surface imposée en début d'exécution.

b) Diagramme de Voronoi après 3022 itérations lorsque toutes les surfaces se trouvent dans une certaine gamme autour de la valeur cible. La couleur des cellules représente leur proximité par rapport à la surface cible, les cellules en bleu et en rouge étant les plus éloignées de celle-ci.

De cette manière, la répartition des points atteint un équilibre pour lequel les premiers voisins de chaque point sont quasi équidistants. Pour un grand nombre de cellules, on peut ainsi obtenir un maillage principalement composé d'hexagones irréguliers mais de surface quasi identiques (cf. figure 5.14b).

L'algorithme pour le calcul du CVT est issu de la page web de John Burkardt (http://people.sc.fsu.edu/~jburkardt/m_src/cvt/cvt.html), il a été modifié sous le logiciel MATLAB pour l'adapter à nos besoins :

- ajout d'un arrêt de l'optimisation quand la surface de toutes les cellules se trouve dans une certaine gamme autour de la valeur cible ;
- modification de la répartition initiale des points pour obtenir une répartition homogène sur les bords ;
- écriture d'un script supplémentaire pour faire la liaison entre MATLAB et le logiciel de dessin de masque.

Pour l'instant le maillage n'a été développé que pour des surfaces circulaires. Des modifications supplémentaires seront nécessaires pour pouvoir paver d'autres types de surfaces.

Comme indiqué ci-dessus, l'algorithme doit s'arrêter lorsque la surface de toutes les cellules se trouve dans une certaine marge autour de la surface moyenne. Cependant, en pratique, nous avons trouvé qu'il est difficile de faire mieux que $\pm 15\%$ d'écart par rapport à la surface idéale. En effet, l'inconvénient de cet algorithme est que le résultat est un minima local qui dépend fortement de la répartition initiale des points au lancement de l'algorithme [Quinn 2012].

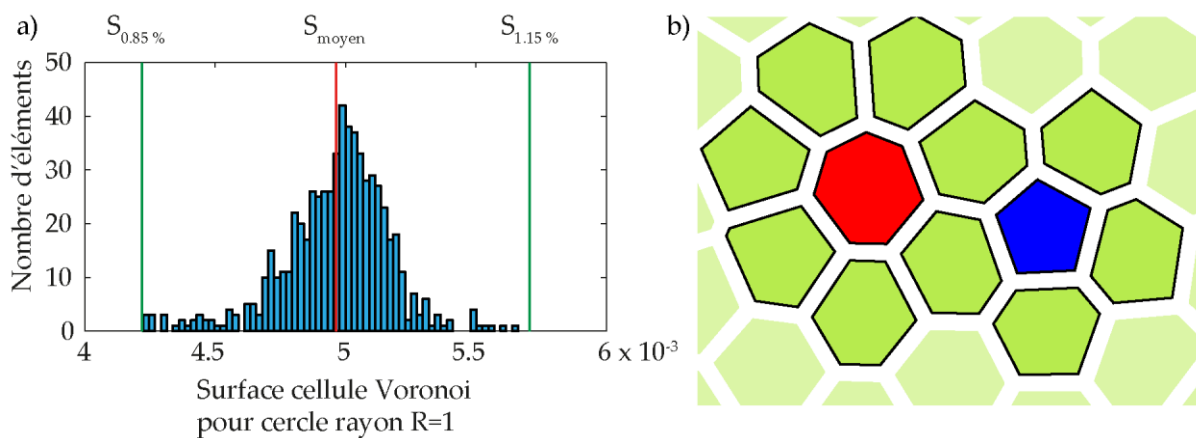


Figure 5.15 : a) Histogramme montrant la répartition des surfaces mesurées sur les cellules de Voronoi de la figure 5.14b. Le trait rouge représente la surface moyenne cible, les deux traits verts sont les limites à $\pm 15\%$ autour de la surface ciblée.

b) Agrandissement montrant des motifs de remplissages non hexagonaux.

La figure 5.15a montre la répartition des surfaces, elle permet de remarquer que la majorité des surfaces des polygones sont centrées à $\pm 5\%$ autour de la surface désirée, et que seules quelques cellules posent problème avec $\pm 15\%$ d'écart de surface. En observant le résultat (cf. figure 5.14b), on peut remarquer qu'en général les cellules ayant une grande surface sont des heptagones, et les cellules ayant une petite surface sont des pentagones (cf. figure 5.15b). Ainsi, ces écarts de surfaces nous imposent de lancer l'optimisation avec une surface requise qui soit au minimum 15 % plus faible que la surface maximale désirée. Heureusement, selon l'étalonnage des vitesses de gravure par DRIE de la partie 5.3.2.2 (p. 147), $\pm 15\%$ d'écart de

surface entre les motifs devrait nous fournir, sur des gravures de 400 μm de profondeur, un écart pic à pic de 10 μm . Vu le faible nombre de surfaces posant problème et le faible écart de la profondeur gravée, nous considérons que ces écarts en surface sont acceptables.

En pratique, le dimensionnement de ces nouveaux types de motifs de remplissage est très simple, car il suffit d'entrer dans le script MATLAB le nombre total d'éléments N devant paver la surface à graver. La valeur de N est calculable à l'aide de la formule (5.1).

$$N = \frac{\pi(R-l-d/2)^2}{2\sqrt{3}\left(\sqrt{\frac{S}{2\sqrt{3}}} + d/2\right)^2} \quad (5.1)$$

Cette formule a été écrite pour paver une surface circulaire de rayon R (cf. figure 5.16) avec des motifs de remplissage :

- supposés hexagonaux avec une surface moyenne S (à choisir 15 % plus faible) ;
- ayant des parois entre ouvertures de largeur d ;
- et comportant une tranchée de largeur l détournant toute la grille.

Ainsi, par exemple, pour recouvrir un disque de rayon $R = 2597 \mu\text{m}$ avec des motifs de remplissage de surface $S = 22784 \mu\text{m}^2$ (soit 85 % de 26805), séparés par des parois de largeur $d = 30 \mu\text{m}$ et entourée par une tranchée de largeur $l = 75 \mu\text{m}$, il faut $N = 617$ éléments.

Cependant, la largeur de la paroi qui détoure toute la grille ne doit surtout pas avoir de trous (la raison sera expliquée dans la partie suivante). Elle doit donc être légèrement plus épaisse avec 40 μm de large au lieu de 30 μm de large. Ainsi il faut utiliser dans la formule (5.1) $l = 85 \mu\text{m}$ (75 μm + 10 μm de largeur en plus pour la paroi) à la place de $l = 75 \mu\text{m}$. Ceci donne $N = 612$ éléments au lieu de 617 éléments.

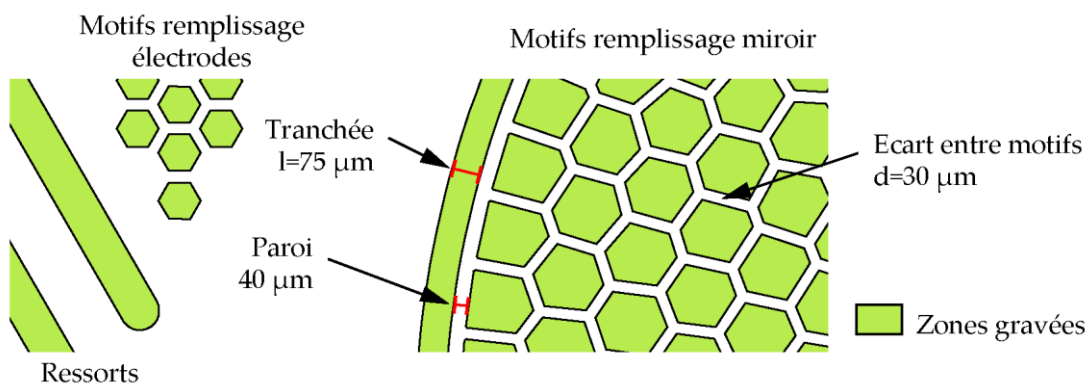


Figure 5.16 : Dimensions retenues pour trouver le nombre de motifs de remplissage à utiliser pour paver un disque de rayon $R = 2597 \mu\text{m}$ avec des motifs ayant une surface maximale de $26805 \mu\text{m}^2$.

Notons que la formule (5.1) a été calculée pour paver une surface circulaire. Pour d'autres formes de surfaces, il suffira de remplacer le numérateur par la valeur de la surface à remplir.

5.5 Conclusion

Pour résumer ce chapitre, nous avons pu contourner les problèmes de RIE lag en nous servant de deux types de motifs de remplissage : des piliers et des grilles.

Nous avons pu vérifier que dans notre cas le macro-loading peut être négligé, car l'homogénéité de la vitesse de gravure DRIE sur l'ensemble du wafer est de $\pm 4 \mu\text{m}$ pour $400 \mu\text{m}$ de profondeur gravée au niveau de tranchées de $100 \mu\text{m}$ de large. Pour contrer ces variations, nous avons pris une marge de sécurité de $10 \mu\text{m}$ lors du dimensionnement des motifs de remplissage. De même, malgré des surfaces importantes de gravure au niveau de chaque structure de test, les mesures effectuées sur les deux types de motifs de remplissage semblent être peu impactées par le micro loading.

Les deux types de motifs de remplissage qui ont été testés ont chacun leurs avantages et inconvénients :

Ainsi, les piliers ont pour avantage d'être extrêmement simples à utiliser, car ils peuvent aisément paver toutes formes d'ouvertures. Cependant, les piliers présentent deux inconvénients : premièrement, pour obtenir une vitesse de gravure plus lente que dans les tranchées de $100 \mu\text{m}$ de large, il faut diminuer l'espacement des piliers à moins de $10\text{-}30 \mu\text{m}$, or dans cette gamme d'écart, les vitesses de gravure n'ont pas été mesurées et peuvent devenir difficiles à ajuster (car fortement dépendantes de l'écart) ; deuxièmement, les piliers peuvent être sous-gravés, se détacher, et perturber la gravure.

A l'inverse, les grilles ont pour avantage de permettre d'ajuster les vitesses de gravure sur une très large gamme, et elles ne sont pas trop sensibles aux faibles variations de taille des motifs. Les grilles sont aussi d'une seule pièce et sont donc plus facilement éliminables que les piliers.

Cependant, si on utilise des motifs de remplissage réguliers, cela pose des problèmes de pavage. C'est pourquoi, à la place de motifs réguliers (carrés ou hexagonaux), nous avons aussi envisagé d'utiliser d'autres formes de grilles, constituées de tranchées ou de polygones irréguliers.

Les premiers essais réalisés à l'aide de motifs hexagonaux réguliers sont encourageants, car la vitesse de gravure a été plus lente sous les électrodes et les miroirs que dans les tranchées de $100 \mu\text{m}$ de large. Cependant, nous n'avons pas pu obtenir de grilles complètement détachables. De plus, à cause d'une erreur de dessin à la périphérie des motifs de remplissage, nous devons passer commande d'une autre version des masques.

Pour finaliser cette étude des motifs de remplissage, il serait nécessaire d'étudier plus en détail les échantillons déjà gravés, et de tester les nouveaux types de motifs de remplissage non détachables en forme de tranchées ou de polygones irréguliers (obtenus par CVT).

Chapitre 6

Protection des structures lors de la gravure XeF₂

La fabrication des membranes (décrite dans la partie 4.5 p127) a permis de mettre en évidence une limitation du procédé actuel de libération de celles-ci. En effet, en fin de gravure DRIE, l'utilisation de deux gravures isotropes (l'une par DRIE pour retirer l'accumulation du polymère de passivation, et l'autre par XeF₂ pour retirer le reste du silicium) produit une gravure latérale, éventuellement inhomogène, qui altère la verticalité des flancs.

C'est pourquoi, dans les deux sous-chapitres qui suivent, sont présentées deux solutions permettant de protéger les structures gravées pendant la gravure avec XeF₂ : l'une utilise la couche de passivation déposée par DRIE, l'autre utilise des films de résine secs.

6.1 Utilisation d'une couche de passivation DRIE

L'avantage de la gravure XeF_2 est que sa sélectivité est très élevée, ainsi la couche protectrice n'a pas besoin d'avoir une résistance chimique ou une épaisseur très élevées. Justement, la couche de passivation utilisée par la gravure DRIE dans le procédé Bosch nous offre deux avantages : c'est un dépôt conforme, et il est simple à structurer avec un plasma O_2 . Cela en fait un candidat idéal pour la protection du cadre et des ressorts pendant l'étape de gravure XeF_2 du silicium sous les miroirs.

La composition et l'énergie d'adhérence de cette couche ont été étudiées à l'IEF pendant la thèse de Guillaume Schelcher [Schelcher 2012]. Il a ainsi trouvé que cette couche est un fluoropolymère composé de liaisons CF_2 (40.3 %), CF_3 (22.7 %), CF (24.5 %) et $C-CF$ (12.5 %). Cette composition est assez proche de celle du polytétrafluoroéthylène (PTFE ou Téflon). Ainsi, par commodité, j'utiliserai dans la suite le terme PTFE pour désigner cette couche.

6.1.1 Principe

Notre objectif est de graver uniquement la fine couche de silicium située au-dessus des miroirs, le reste du silicium (exposé par les gravures DRIE) doit rester encapsulé dans du PTFE. Le procédé de libération des membranes que nous proposons est schématisé sur la figure 6.2 et est décrit ci-dessous :

Figure 6.2a : Vue en coupe de l'échantillon à la fin de la gravure DRIE.

Figure 6.2b : Une fine couche d'environ 100 nm de PTFE est déposée sur l'ensemble du wafer cible sans enlever la résine.

Figure 6.2c : Un pochoir en silicium est ensuite auto-aligné sur le wafer cible. Puis la couche de PTFE est gravée dans un plasma O_2 .

Figure 6.2d : Gravure par XeF_2 du silicium exposé.

Figure 6.2e : En fin de gravure XeF_2 , le wafer cible est d'abord nettoyé dans un plasma O_2 pour retirer le reste de PTFE, puis avec un remover liquide pour retirer la résine.

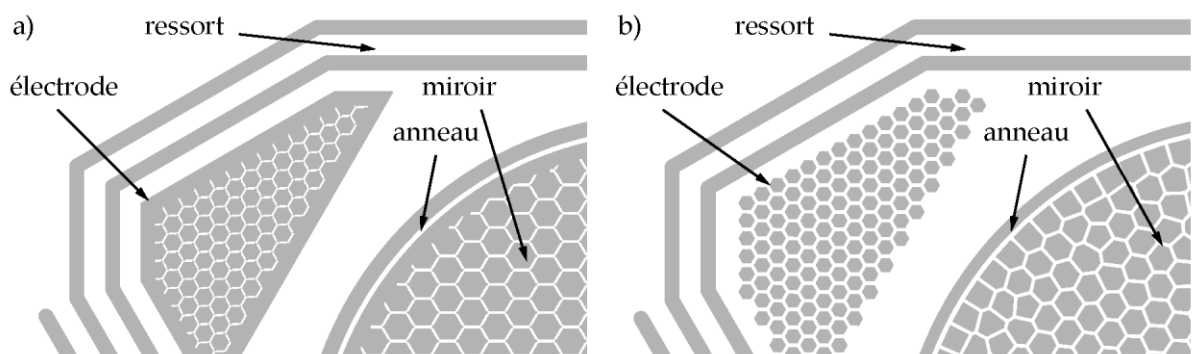


Figure 6.1 : Dessin des deux versions des masques, permettant d'identifier les parties représentées schématiquement sur la figure 6.2.

a) Première version (avec motifs de remplissage réguliers).

b) Deuxième version (avec motifs de remplissage réguliers sous les électrodes, et irréguliers ailleurs).

On notera que le pochoir a été dessiné pour laisser découverte uniquement la surface située à l'intérieur d'un anneau temporaire. Cet anneau (cf. figure 6.1) vise à permettre de conserver du PTFE sur la face intérieure du cadre pour le protéger de la gravure XeF₂ et conserver ses flancs verticaux. A terme, ceci permettrait de réduire l'encombrement de la structure en diminuant la largeur du cadre supportant la membrane.

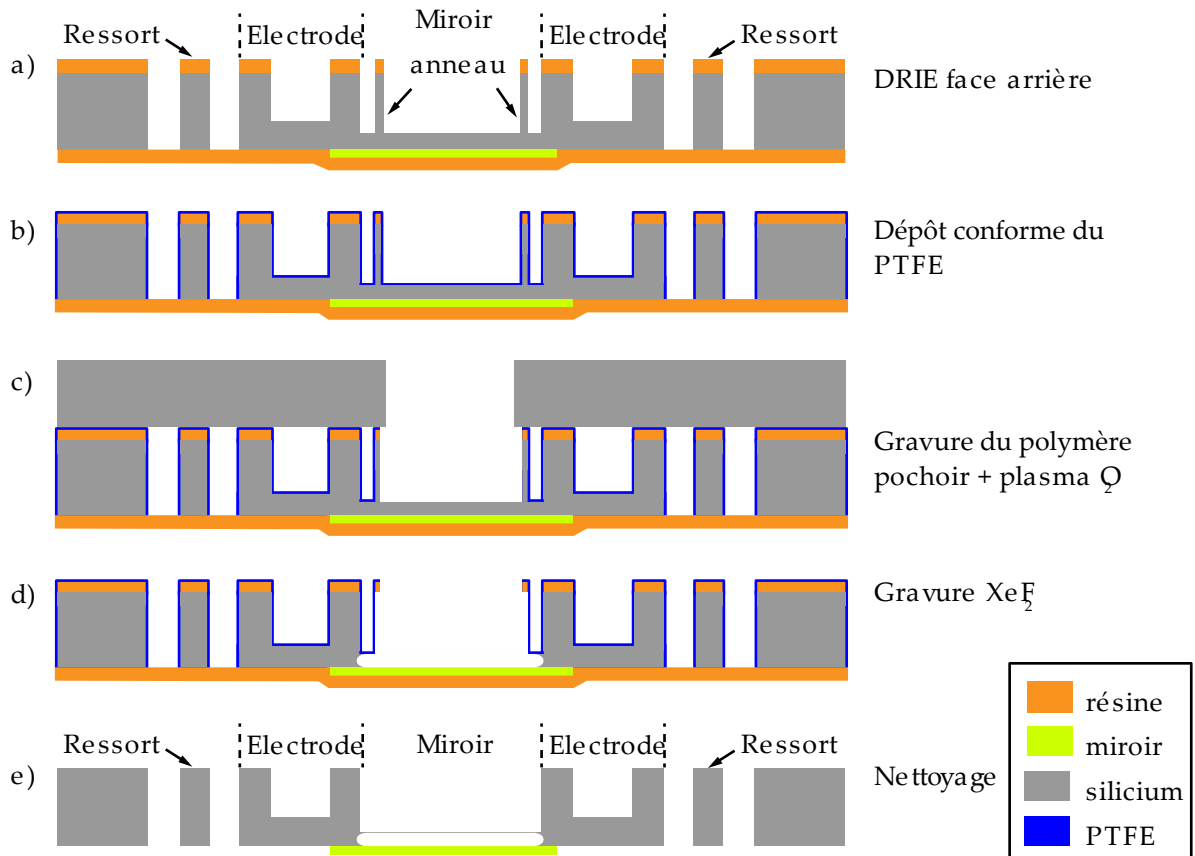


Figure 6.2 : Étapes de la libération des membranes protégées par la couche de passivation. Les motifs de remplissage ne sont pas représentés sur ce schéma.

Ce procédé de libération des membranes suppose remplies deux conditions : il faut d'abord pouvoir structurer la couche de PTFE à l'aide d'un pochoir, et ensuite, il faut trouver un moyen permettant d'aligner avec précision le pochoir sur le wafer contenant les miroirs. Ces deux points sont étudiés dans les parties suivantes.

6.1.2 Résistance du PTFE au XeF₂

Pour tester la résistance du PTFE à la gravure XeF₂, nous avons structuré une couche de 400 nm de PTFE à l'aide d'un masque en résine. Les problèmes d'adhérence et d'étalement de la résine sur ce matériau ont été résolus en recuisant le PTFE à 200 °C pendant 10 minutes, puis en l'exposant à un plasma O₂ durant 18 secondes, avec les paramètres listés dans le tableau 6.1.

gaz	pression	puissance	fréquence
O ₂	06-0.8 mbar	160 W	40 kHz

Tableau 6.1 : Paramètres utilisés pour le plasma O₂ dans le délaqueur PICO de marque Diener Electronic.

Après insolation et développement de la résine, les 400 nm de PTFE ont été gravés à l'aide d'un plasma O₂ de 10 minutes avec les mêmes paramètres que précédemment. La résine a ensuite été retirée pour ne laisser que la couche de PTFE, et le wafer a été exposé au XeF₂ avec 50 cycles de gravure, chaque cycle consistant à exposer le wafer à 3 Torr de XeF₂ pendant 15 secondes. Le résultat de cette gravure (cf. figure 6.3), montre que les zones recouvertes par le PTFE sont restées intactes : le PTFE devrait donc protéger efficacement les flancs de gravure contre l'attaque du XeF₂.

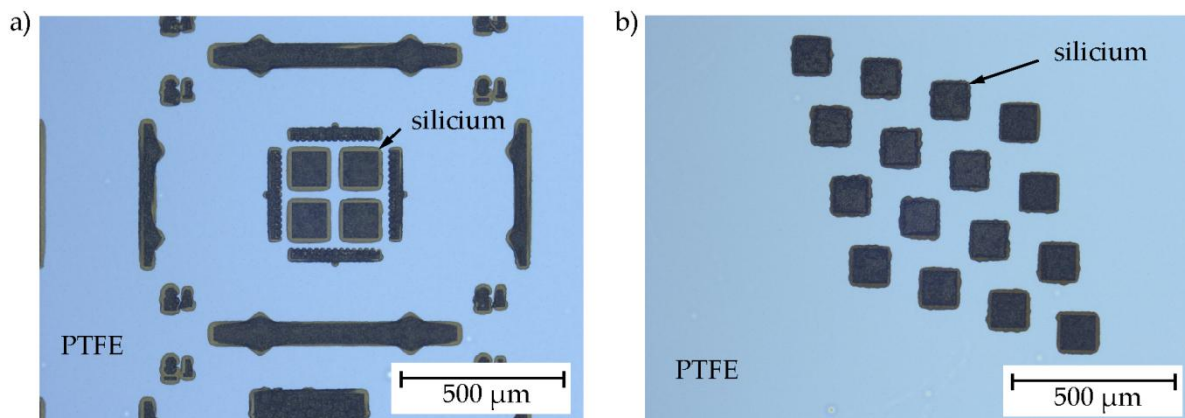


Figure 6.3 : Deux images acquises au microscope optique montrant la gravure par le XeF₂ des zones non protégées par le PTFE.

6.1.3 Structuration du PTFE par un pochoir en silicium

La partie précédente permet de confirmer que la couche de PTFE protège le silicium du XeF₂, cependant, dans le procédé final nous utiliserons une méthode de structuration par pochoir. Cette méthode de structuration a été testée en posant simplement un pochoir sur le PTFE non recuit, et la couche a ensuite été gravée au travers des ouvertures du pochoir.

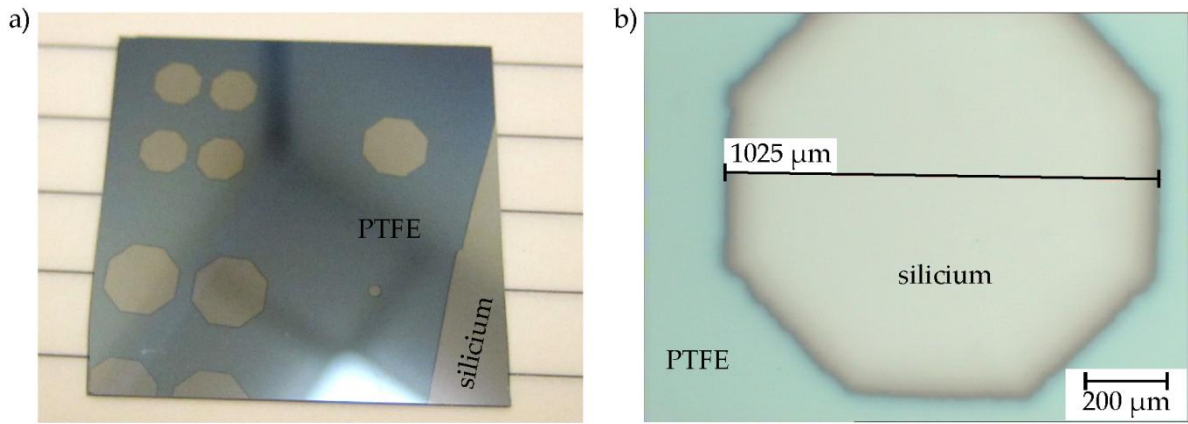


Figure 6.4 :

a) Image d'un échantillon gravé à l'aide d'un pochoir en silicium posé sur la couche de PTFE.

b) Zoom sur un motif après gravure.

La figure 6.4 montre le résultat d'une gravure d'un film de PTFE dans un plasma O₂ à travers un pochoir en silicium simplement posé sur le PTFE. Certes, la structuration du PTFE par pochoir donne des flancs moins bien définis qu'après une structuration par un masque en résine, mais cet essai montre qu'au moins, il ne sera pas nécessaire d'exercer une pression sur le pochoir pour le plaquer contre le PTFE.

Faute de temps, nous n'avons pas pu tester la structuration et la résistance du PTFE en situation réelle avec des gravures profondes, mais toutes les conditions nécessaires sont remplies pour que cette protection soit fonctionnelle.

6.1.4 Alignement mécanique du pochoir en silicium

Pour pouvoir faire une structuration par pochoir du PTFE, le principal problème à résoudre a été de trouver une méthode qui permette de maintenir l'alignement du pochoir sur le wafer cible pendant la mise sous vide précédant la gravure par plasma O₂ du PTFE.

Le positionnement et l'immobilisation d'un wafer pochoir sur un wafer cible est souvent réalisé en utilisant un aligneur et un support mécanique. Il existe aussi d'autres méthodes comme un autoalignement avec des aimants ou des méthodes d'alignement mécanique avec des motifs en bosse et en creux en vis-à-vis ou avec des piges dans des rainures en V gravées avec KOH. Dans cette partie, nous présentons une autre méthode d'alignement mécanique qui a l'avantage de ne pas avoir besoin d'un support spécifique ou d'étapes technologiques supplémentaires.

La procédure d'alignement développée profite de l'existence d'une étape de gravure profonde qui traverse tout le wafer cible pour rajouter des ouvertures au travers desquelles des piges d'alignement sont insérées. L'alignement mécanique et le maintien du pochoir sur le wafer sont assurés par des ressorts fabriqués manuellement avec de la corde à piano.

Le principe d'alignement est simple et est décrit ci-dessous :

L'alignement repose sur la forme des ouvertures pratiquées sur les deux wafers. Deux types d'ouvertures sont utilisées (cf. figure 6.6a) :

- des ouvertures qui servent de référence avec une forme carrée et des coins arrondis (pour éviter le clivage du wafer) ;
- des ouvertures ovales qui fournissent plusieurs degrés de liberté au bras du ressort.

Différentes combinaisons d'ouvertures sont présentes sur chacun des deux wafers. Ceci est schématisé dans la figure 6.6b, c et d : le pochoir possède les ouvertures dessinées en noir, et le wafer cible celles dessinées en rouge. Ces combinaisons d'ouvertures sont choisies de manière à ce que les bras des ressorts ne prennent appui que sur les ouvertures carrées pour former des butées de référence. Les ressorts ne doivent pas toucher les ouvertures ovales, car ces ouvertures ovales ne sont là que pour fournir des degrés de liberté aux bras des ressorts ne servant pas de butée de référence. L'alignement des wafers se fait à l'aide de quatre ressorts. Trois des quatre ressorts sont utilisés pour former des butées fixes de référence, autocentrées contre les parois des trous carrés. Le quatrième ressort est utilisé pour plaquer les ouvertures carrées du wafer cible (de même dimensions que celles du pochoir) contre les trois butées fixes de référence. Ce montage fournit donc un alignement isostatique, à moindre coût. L'avantage de cette méthode est que les ressorts servant à l'alignement peuvent entrer dans le bâti de gravure par plasma O_2 , et permettent de maintenir l'alignement du pochoir pendant la gravure du PTFE.

Cependant, pour que le procédé fonctionne, il est important que les deux wafers restent en contact et ne se séparent pas lors de la mise sous vide, c'est pourquoi des ouvertures supplémentaires ont été rajoutées au pochoir (cf. figure 6.6d et figure 6.5), elles ont été placées de manière à éviter d'emprisonner des poches d'air trop importantes.

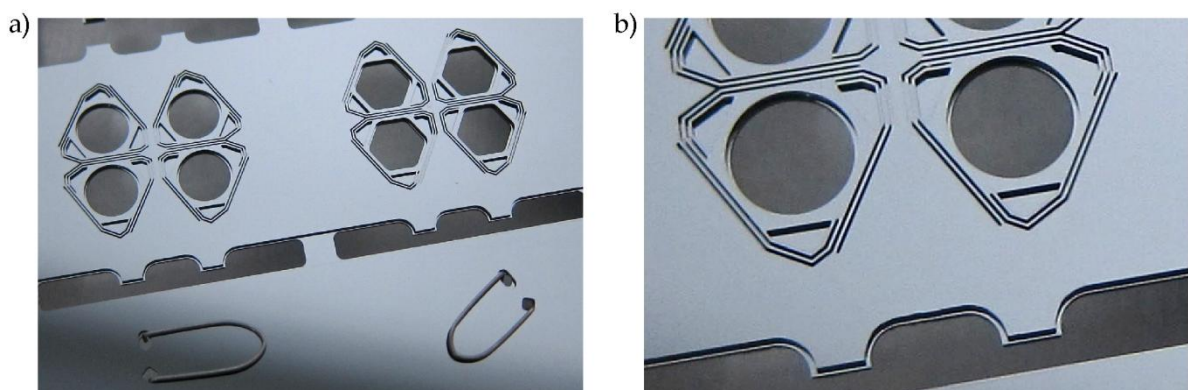


Figure 6.5 : Photographie montrant le pochoir et un wafer gravé.

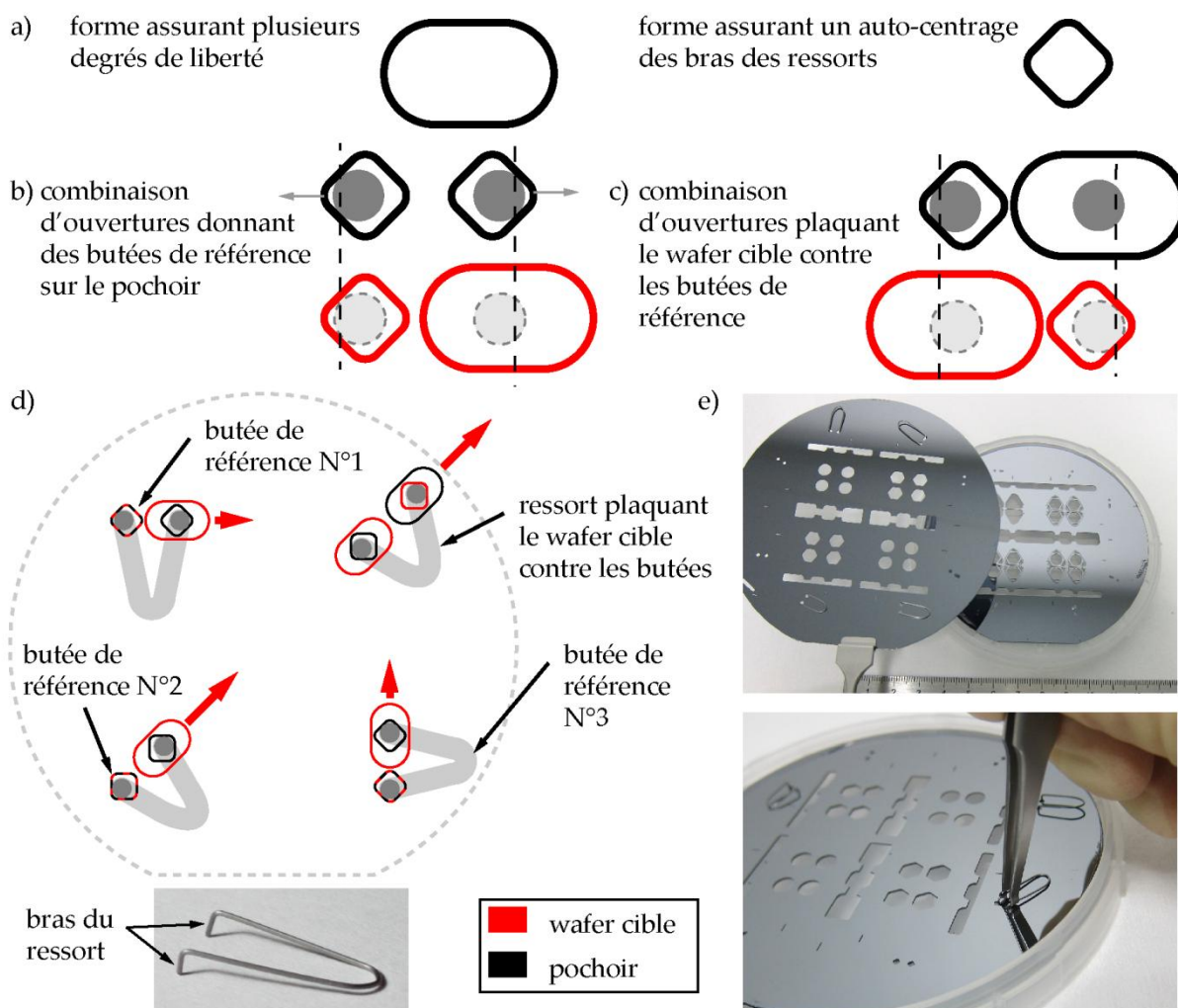


Figure 6.6 : Procédé d'alignement.

La précision de l'alignement est garantie d'une part par la forme des ouvertures au travers desquelles passeront les ressorts servant de butées, et d'autre part par le plaquage du wafer cible contre ces butées (voir figure 6.6). La précision est limitée par les défauts des ressorts, et par la précision des gravures du pochoir et du wafer cible.

En pratique, la précision de l'alignement d'un pochoir a été testée avec un wafer possédant les structures du MOEMS (figure 6.5). En observant la face arrière du wafer cible, la précision d'alignement a été estimée à $\pm 7 \mu\text{m}$, ce qui est largement suffisant pour notre application.

6.1.5 Conclusion

Dans cette partie j'ai exposé deux méthodes de structuration du PTFE dans un plasma d'oxygène.

La première méthode, qui utilise une photolithographie, a initialement été développée pour la version du procédé de fabrication sur SOI (cf. annexe E p209). Mais en raison de la forte structuration des wafers, elle ne sera réellement exploitable qu'avec un enrésinement par pulvérisation (spray coating).

La seconde méthode de structuration du PTFE utilise un pochoir (shadow mask) aligné mécaniquement avec des ressorts. Elle présente l'avantage de pouvoir être réalisée en un minimum d'étapes, et la méthode d'alignement mécanique du pochoir nous offre une précision de $\pm 7 \mu\text{m}$, ce qui est suffisant pour le projet.

Le test de résistance du PTFE au XeF_2 décrit dans cette partie ne reproduit pas exactement les conditions dans lesquelles le PTFE sera utilisé comme couche de protection, mais les résultats obtenus montrent que la structuration par pochoir du PTFE est faisable, et que le PTFE peut être utilisé pour protéger le silicium pendant la gravure dans le XeF_2 .

Pour le cas où malgré tout la protection des ressorts et du cadre par le PTFE ne fonctionnerait pas bien, nous avons la possibilité d'utiliser une autre technique de protection du silicium avec des films de résine secs, présentée dans la partie suivante.

6.2 Lithographie avec films secs photosensibles

Les films secs photosensibles (dry films) sont des films de résine qui s'appliquent par laminage à l'aide de cylindres chauffants (figure 6.7a). Ces films sont vendus sous forme de rouleaux (figure 6.7b) et sont protégés par deux films en plastique : l'un en polyester et l'autre en polyéthylène (à peler avant enrésinement). Comme c'était la toute première fois que ce type de résine photosensible était utilisé à l'IEF, la technique a dû être mise au point durant la thèse en vue de l'utiliser pour certaines étapes de fabrication.

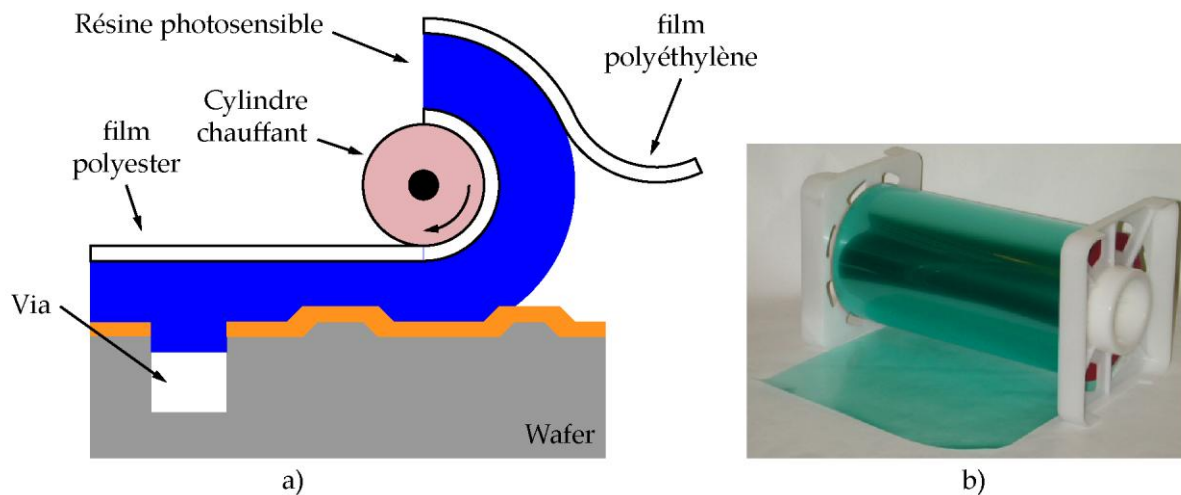


Figure 6.7 : a) La résine est protégée des deux côtés par un film en polyéthylène (pelé avant application) et par un film en polyester (conservé pendant l'enrésinement) : ce dernier film, transparent aux UV, peut aussi être conservé pendant l'insolation.

b) La résine est livrée sous forme de rouleaux.

6.2.1 Intérêt des films secs

Ces résines ont été initialement développées pour la fabrication de circuits imprimés de grande surface. Pour la microfabrication, ce type de résine offre aussi de nombreux avantages, décrits ci-dessous.

6.2.1.1 Comparaison des résines liquides et des films secs

L'enrésinement par centrifugation ("spin coating") de résines liquides présente des limitations bien connues :

- une forte sensibilité aux poussières conduisant à des inhomogénéités d'épaisseur et à la formation de trous ;
- la formation de bourrelets à la périphérie du wafer, imposant (pour les résines épaisses) un détournage ;
- l'impossibilité d'enrésiner des surfaces fortement structurées avec une résine mince d'épaisseur homogène.

Comparées aux résines liquides, les résines sous forme de film sec offrent comme avantages :

- une épaisseur élevée (15-120 μm) ;
- pas de formation de bourrelet de résine sur les bords du wafer ;
- enrésinement de wafers structurés possible, car la résine enjambe les tranchées profondes, permettant d'obtenir :
 - Des fonds de trous sans résine, utiles pour de l'électrodéposition dans des trous,
 - L'absence de striation sur les wafers déjà structurés (épaisseur homogène) ;
- enrésinements multiples possibles (par exemple : pour faire des canaux de microfluidique [Vulto 2004] ou pour régler l'épaisseur en fonction des besoins [Stephan 2007]) ;
- enrésinement + lithographie + développement "rapide" en 1-2 heures au lieu d'une demi-journée pour les résines liquides épaisses (à cause des temps de recuit et des durées de repos) ;
- le recouvrement de manière sûre de l'intégralité du wafer avec une épaisseur constante de résine et sans trous ;
- résines moins toxiques, car sans solvants.

Cependant, les films secs présentent aussi des inconvénients :

- l'impossibilité d'ajuster finement l'épaisseur de la résine, car l'épaisseur ne peut être ajustée qu'en empilant plusieurs couches ;
- un faible rapport d'aspect des motifs réalisables, souvent aux alentours de 1, ce qui donne une "faible" résolution : pour de la MX5015 (le film sec utilisé) il est difficile de développer des motifs inférieurs à 20 μm à cause d'un problème d'adhérence lors du développement ;
- les flancs des motifs en résine sont parfois peu favorables aux métallisations ;
- emprisonnement facile de bulles d'air au niveau des motifs structurés, même des plus petits ;
- fond des trous sans résine, ne permettant pas l'insolation de motifs au fond de ces derniers.

Lors de la fabrication des filtres Fabry Pérot, nous envisageons d'utiliser les films secs pendant les étapes de métallisation, de gravure RIE du borosilicate et éventuellement pour l'assemblage des trois wafers composant la matrice de filtres (avec un autre type de film sec).

Mais les films secs peuvent aussi nous offrir une alternative intéressante aux deux points-clés du procédé de fabrication :

Premièrement, les films secs peuvent permettre de s'affranchir de l'utilisation de motifs de remplissage temporaire, car ils permettent des lithographies successives sur des wafers fortement structurés.

Deuxièmement, les films secs peuvent remplacer le PFTE pendant l'étape de libération des miroirs par XeF_2 , car leur capacité à enjambrer les gravures profondes peut permettre d'encapsuler les parties à protéger.

6.2.1.2 Sélection du film sec

Tous les avantages et inconvénients ont été pris en compte dans le choix de la résine. Les films secs ne permettent typiquement que la délimitation de motifs avec un rapport d'aspect proche de 1. Pour bénéficier de la meilleure résolution possible, nous avons donc choisi le film sec le plus fin disponible : MX5015 (15 µm d'épaisseur) produit par Dupont. De plus, d'après la brochure du fournisseur, ces films secs sont spécialement conçus pour la microfabrication. En particulier, pour notre procédé de fabrication, les caractéristiques intéressantes sont :

- leur adhérence sur silicium ;
- le révélateur est compatible avec la majorité des matériaux ;
- la sélectivité élevée de gravure DRIE du silicium par rapport au film sec ;
- la résistance à des températures élevées (>200 °C) ;
- le film sec est amovible (d'autres films sont permanents ex : la série PermMX de Dupont) ;
- la résine a une polarité négative (ce qui est insolé reste).

6.2.2 Equipements utilisés

Pour étaler les films de résine deux modèles de plastifieuses à rouleaux chauffants ont été achetés : le Heatseal H535 Turbo (figure 6.8a), et le Excelam II - 355G (figure 6.8b).

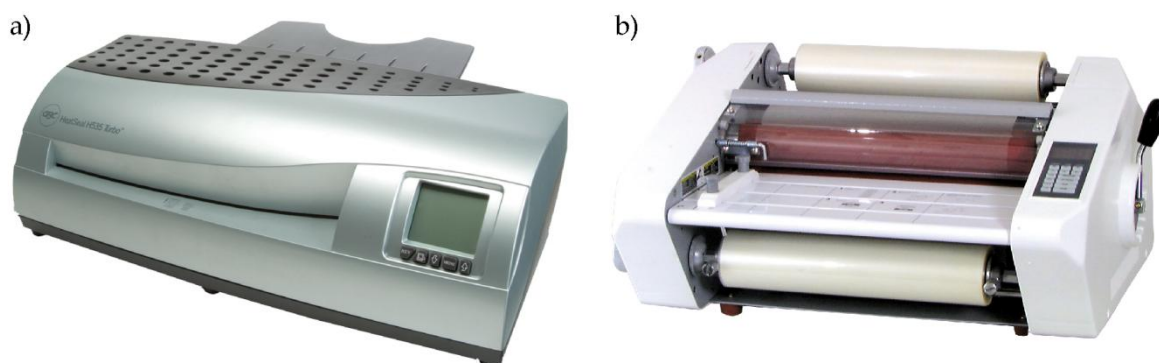


Figure 6.8 : a) Plastifieuse Heatseal H535 Turbo. b) Plastifieuse Excelam II - 355G.

	Plastifieuse	
	Heatseal H535 Turbo	Excelam II - 355G
Pression	✗ fixe	✓ ajustable 6 niveaux
Température maximale	✓ 160 °C	✗ 150 °C
Vitesse	✗ 100 cm/min	✓ 45.6-160 cm/min
cylindre chauffant	✗ chauffage externe	✓ chauffage interne
contrôle température	✗ diode	✓ capteur infrarouge
épaisseur échantillon	✗ 2.5 mm	✓ 5 mm
Largeur maximale lamination	✗ 297 mm	✓ 355 mm
Dimensions (H, L, P)	• 152 x 594 x 282 mm	✗ 310 x 620 x 530
Poids	• 9.65 kg	✗ 25 kg
automatisation possible	✗ non	✓ oui

Tableau 6.2 : Comparaison des propriétés des deux plastifieuses.

Le tableau 6.2 permet de comparer les deux plastifieuses : la plastifieuse Excelam est la plus avantageuse, car elle possède un réglage de la pression, de véritables cylindres chauffants et la possibilité de laminer une épaisseur plus importante que la Heatseal. Cependant, la Heatseal a l'avantage d'être compacte et légère ce qui permet un usage temporaire dans une hotte à flux laminaire. La plastifieuse Excelam est plus encombrante et lourde, elle nécessite une installation permanente en salle blanche.

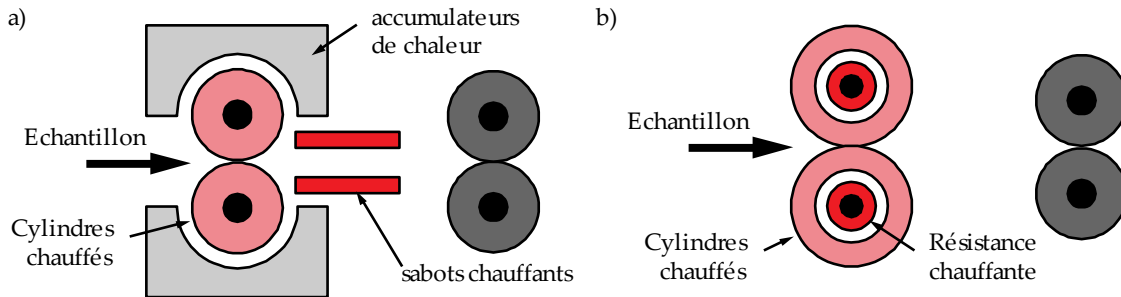


Figure 6.9 : a) Principe de fonctionnement des rouleaux chauffants du laminateur Heatseal H535 Turbo utilisant des sabots chauffants et des accumulateurs de chaleur pour chauffer l'extérieur des rouleaux.

b) Principe de fonctionnement des rouleaux chauffants du laminateur Excelam II- 355G avec des résistances chauffantes passant au centre des rouleaux chauffants.

Ces deux machines se distinguent surtout au niveau des cylindres chauffants :

La plastifieuse Heatseal utilise un système de sabots chauffants et d'accumulateurs de chaleur pour chauffer l'extérieur des cylindres (figure 6.9a). La température est contrôlée par une diode placée en contact direct avec les cylindres chauffés. Une seconde paire de cylindres sert à tirer sur l'échantillon et à réduire le choc thermique en sortie. Ce procédé de chauffage a pour principal inconvénient d'exposer les wafers aux variations de températures des sabots chauffants. Des mesures ont ainsi mis en évidence une variation importante de la température des sabots chauffants (± 25 °C) avec une valeur moyenne de 175 °C qui est très éloignée de la température de consigne de 100 °C qui a été fixée pour cette mesure de stabilité.

La plastifieuse Excelam utilise des cylindres chauffés par une résistance centrée sur leur axe (figure 6.9b) et donc les wafers ne sont jamais exposés directement aux résistances chauffantes. Là aussi, une seconde paire de cylindres sert à tirer sur l'échantillon et à réduire le choc thermique en sortie. Faute de temps, la stabilité en température des cylindres n'a pas pu être mesurée, mais la présence d'un capteur infrarouge monté sur la machine rend possible une lecture directe de la température avant enrésinement, cela permet donc de vérifier avant laminage que la température des cylindres est correcte.

La plastifieuse Excelam permet d'automatiser l'enrésinement, en pelant le film de protection et en maintenant tendus les films de résine au-dessus des wafers. Nous l'avons adaptée pour permettre d'employer les rouleaux de films secs (qui ont un diamètre plus important que les

rouleaux de plastification), et nous l'avons équipée d'une petite hotte aspirante pour permettre son utilisation en dehors d'une hotte d'enrésinement (cf. figure 6.10). Le montage des rouleaux pour l'enrésinement automatisé est schématisé sur la figure 6.11. Il est important de noter que pour automatiser l'enrésinement, il faut, en plus des films secs, utiliser des rouleaux de polyester pour protéger les cylindres chauffants du dessous.

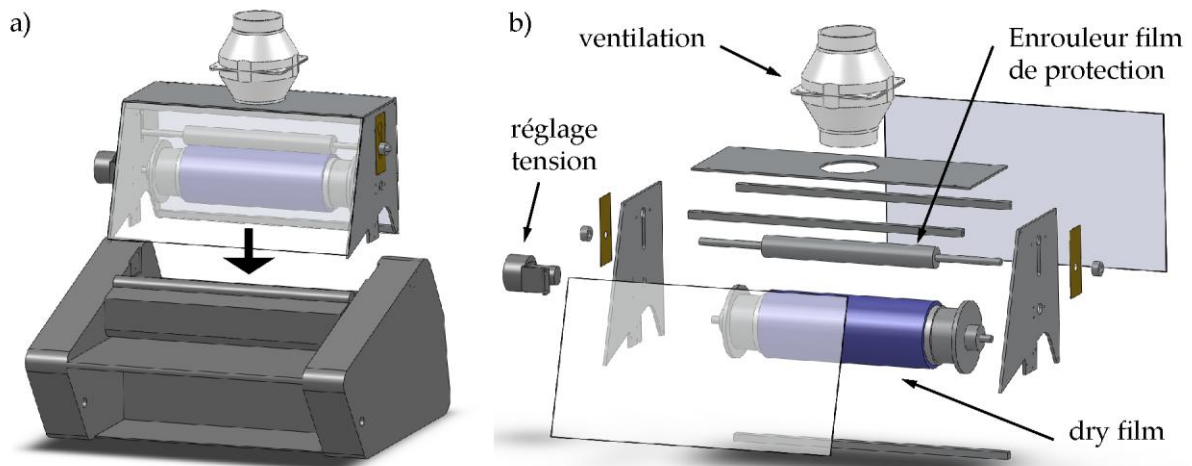


Figure 6.10 : a) Modifications réalisées sur la plastifieuse Excelam pour permettre de monter les rouleaux de film secs et créer une hotte aspirante permettant d'utiliser l'appareil hors des hottes d'enrésinement.

b) Vue éclatée de l'adaptateur réalisé, le réglage de la tension du film et les supports pour rouleaux de film secs étaient déjà fournis avec l'appareil, les autres pièces ont été conçues et fabriquées à l'IEF.

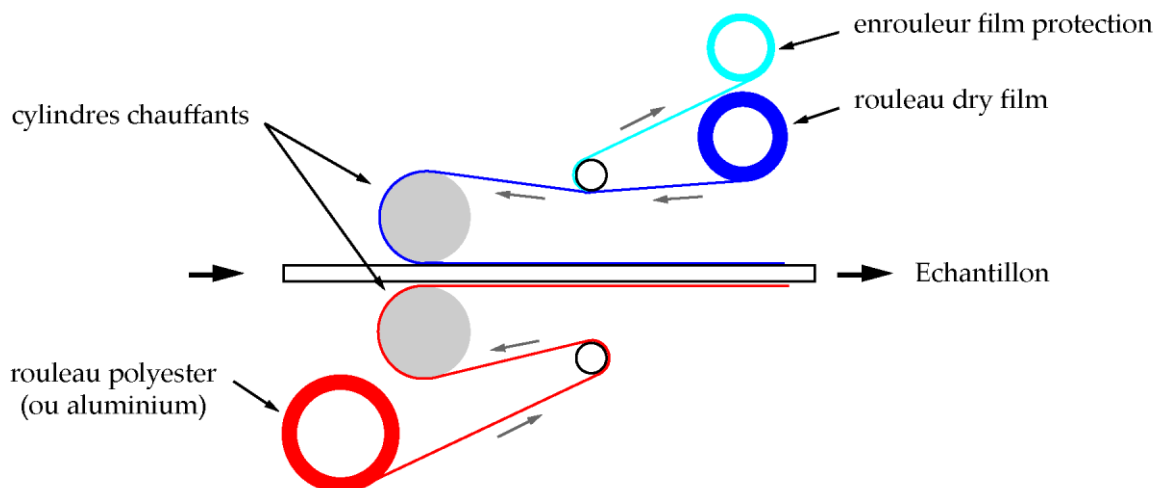


Figure 6.11 : Configuration des rouleaux pour l'enrésinement automatisé à l'aide de la plastifieuse Excelam.

6.2.3 Procédure d'enrésinement

La plastifieuse Excelam n'a été opérationnelle qu'en fin de thèse, donc pour la majorité des enrésinements, nous avons utilisé la Heatseal. Nous n'avons pas tenu compte des variations de température des cylindres. Ainsi, les paramètres d'enrésinement présentés ci-après sont des valeurs préliminaires non optimisées.

Laminage : C'est la partie la plus délicate de l'enrésinement, car la résine MX5015 a une faible épaisseur (15 μm), et le risque d'emprisonner des bulles d'air dans des plis (qui apparaissent lors de la lamination) est très élevé. Le fournisseur de la résine conseille une température de 95 °C et une vitesse de 1.2m/min. En pratique, sur la plastifieuse Heatseal, la vitesse de laminage la plus lente a été utilisée (vitesse non mesurée), et pour que la résine soit suffisamment chauffée, il a fallu utiliser une température supérieure à 100 °C.

Recuits : D'après la fiche du fournisseur de la résine MX5015, plusieurs recuits sont possibles, chacun ayant un impact différent :

- après lamination cela augmente l'adhérence et la résistance chimique ;
- après insolation cela augmente la résolution, la résistance chimique et donne des flancs verticaux ;
- après développement cela a les mêmes effets que le recuit après insolation.

Ces trois recuits ont été testés mais aucune variation significative n'a pu pour l'instant être observée, il est possible que cela provienne du mauvais contrôle de température dans la Heatseal, il faudra donc refaire les essais sur l'autre lamineur.

		épaisseur résine	
		15 μm	30 μm
substrat	silicium	65 mJ/cm ²	115 mJ/cm ²
	borosilicate	98 mJ/cm ²	X

Tableau 6.3 : Doses d'insolation utilisées pour différents supports et épaisseurs de film sec.

Insolation : Les doses d'insolation utilisées sont listées dans le tableau 6.3. L'épaisseur de 30 μm a été obtenue par double enrésinement. Des insolutions sur un wafer en borosilicate ont aussi été essayées, nous avons obtenu des résultats satisfaisants en multipliant les doses d'insolation du tableau 6.3 par 1,5.

Développement : Après pelage du film en polyester, nous avons utilisé du MRD4000 / 75, un révélateur contenant 0.75 % de carbonate de potassium et commercialisé par Micro Resist Technology.

Retrait de la résine : Une fois insolée, la résine ne peut plus être dissoute en utilisant de l'acétone, il faut utiliser un "remover". Trois removers ont été testés : P1316 (Technic), AZ100 (Clariant), et Remover PG (MicroChem). Les trois removers ont été chauffés par bain marie à 60 °C. Le remover ayant le mieux fonctionné est le P1316, car il décolle la résine en moins d'une minute. Cependant, il est important de remarquer qu'aucun des trois removers testés ne dissout la résine, en effet, au contact avec le remover, la résine devient transparente et se fragmente en se détachant du wafer.

6.2.4 Tests technologiques

6.2.4.1 Problèmes de micro-bulles

Le plus gros souci rencontré provient des bulles d'air emprisonnées qui apparaissent même si la surface du wafer est complètement lisse. Ces bulles d'air ont des dimensions variables, pouvant aller de quelques millimètres à une dizaine de microns :

Les plus grosses bulles ne se forment que si des plis apparaissent pendant le laminage, ces défaut sont facilement évitables.

Plus gênantes, des micro-bulles (10-20 μm) apparaissent en permanence sur toute la surface du wafer, même si celui-ci est entièrement lisse. Ces micro-bulles semblent avoir essentiellement deux origines : la texturation des cylindres chauffants, et les structurations du wafer. Ce problème est probablement moins important avec des films secs plus épais.

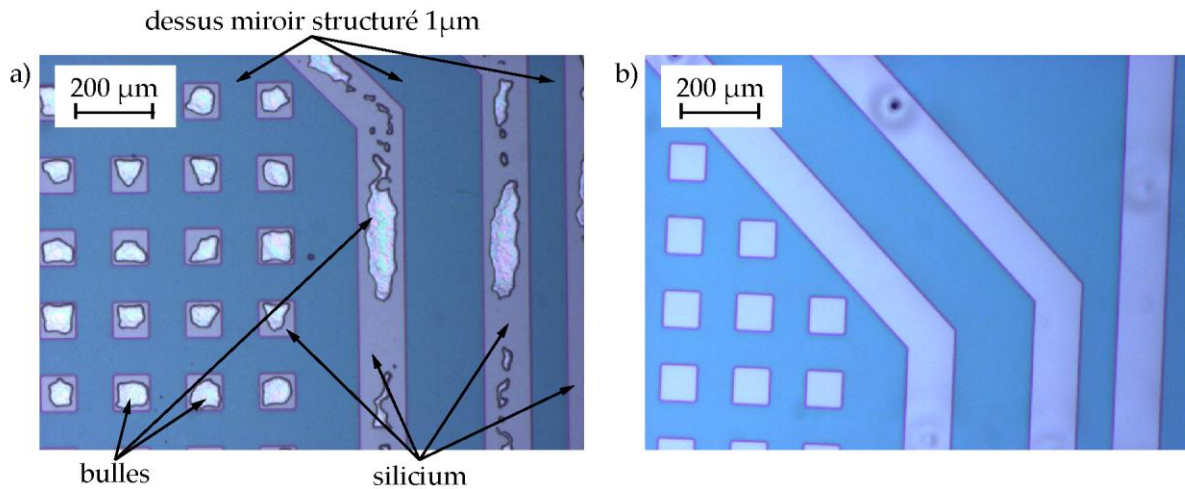


Figure 6.12 : a) Après lamination, des bulles d'air peuvent être emprisonnées si le wafer comporte des structures de seulement 1 μm de haut.

b) Un recuit sans le film en polyester permet d'éliminer ces bulles.

La seconde source de micro-bulles provient des structurations du wafer. La figure 6.12a montre qu'une simple structuration de 1 μm (miroirs multicouches gravés) est suffisante pour former des micro-bulles.

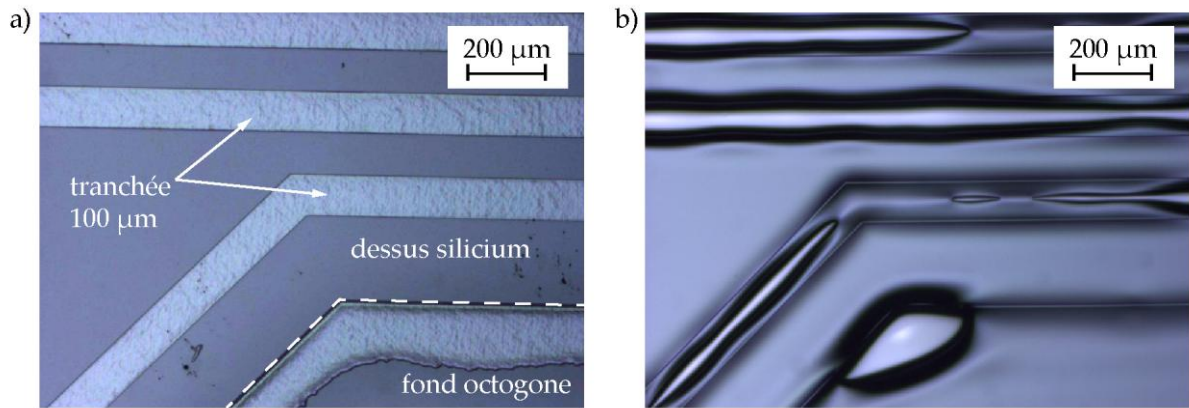


Figure 6.13 : a) Image au microscope optique montrant les bulles d'air emprisonnées dans des gravures de 5 µm de profondeur.
 b) Résultat après recuit sans film de polyester, des trous apparaissent.

Pour des structurations plus profondes de 5 µm (cf. figure 6.13a), la résine enjambe complètement les tranchées de 100 µm. Par contre, la résine touche le fond du motif si les motifs font plus de 100-200 µm de large. Un tel exemple est visible dans le coin inférieur droit de la figure 6.13a, au niveau de l'ouverture octogonale.

Il est utile de mentionner que les micro-bulles peuvent dans certaines conditions être éliminées en retirant le film de polyester (ce qui met la résine à nu) et en recuisant avant insolation le wafer à 100-110 °C pendant 1'20". Cependant, cette méthode ne peut fonctionner que si les bulles d'air sont de faible volume (cf. figure 6.12b), car si les bulles d'air ont un volume plus élevé, elles risquent de former des trous, ou tout du moins des inhomogénéités d'épaisseurs importantes (cf. figure 6.13b).

Heureusement les recuits des films de résine recouvrant de grosses cavités restent faisables sans introduire de défauts, pour cela il suffit d'insoler la résine avant recuit, car une fois insolée la résine n'est plus capable de fluer et donc les bulles d'air resteront emprisonnées.

Faute de temps, nous n'avons pas fait suffisamment d'essais pour trouver les paramètres de laminage permettant un enrésinement sans micro-bulles. Pour cela, il sera nécessaire d'utiliser le laminateur Excelam qui permet de faire varier la température, la vitesse et la pression des cylindres chauffants. Néanmoins, pour notre application, les micro-bulles ne sont pas gênantes, nous pourrions donc utiliser les films secs.

6.2.4.2 Flancs et fond des motifs

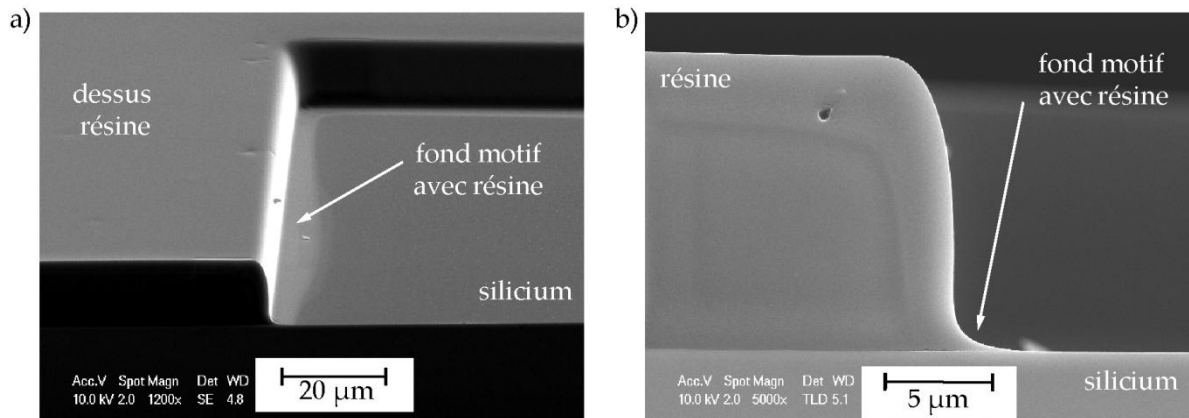


Figure 6.14 : Deux images prises au microscope électronique à balayage montrant à gauche une vue d'ensemble de la résine développée, à droite le flanc de la résine.

D'autres problèmes ont été mis en évidence lors des premiers essais :

- premièrement, les flancs des motifs ne sont verticaux que sur environ 2/3 de l'épaisseur (cf. figure 6.14), avec un arrondi au sommet, et un excès de résine au pied des motifs ;
- deuxièmement, il est difficile de retirer la résine au fond de motifs de grande surface (cf. figure 6.15b).

Ces défauts sont évidemment gênants pour les métallisations (figure 6.15a), et pour les gravures du silicium (cf. figure 6.15b). Ils n'ont malheureusement pas pu être résolus en laissant l'échantillon plus longtemps dans le développeur, car dans ce cas, les motifs de petite taille (<20-30 μm) se décollent. Pour le moment, la seule solution envisageable est donc d'utiliser systématiquement un plasma O₂ pour nettoyer les fonds des motifs.

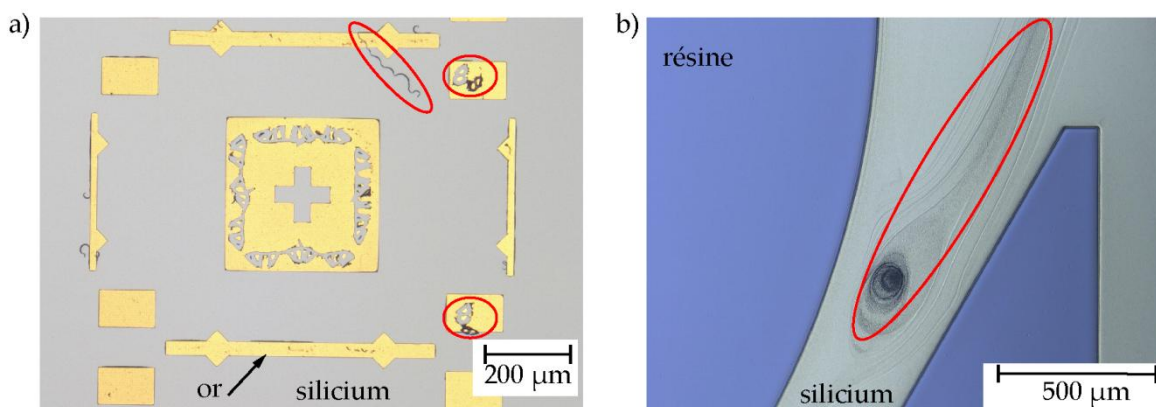


Figure 6.15 : a) Résultat de la métallisation sur silicium par lift-off de 200 nm d'or avec pour sous couche d'adhérence 20 nm de chrome. La fine couche de résine au fond des motifs développés crée des défauts sur les bords des métallisations.

b) Fond de motif mal développé après une gravure DRIE de 2 μm, la fine couche de résine a ralenti la vitesse de gravure.

6.2.4.3 Enrésinement de gravures profondes

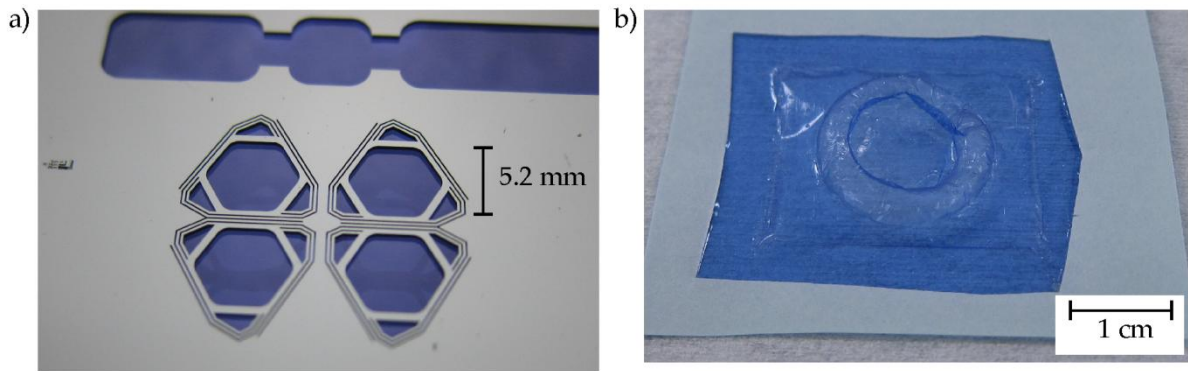


Figure 6.16 : a) Enrésinement de 15 μm de film sec sur des structures entièrement débouchantes de grandes dimensions.

b) Vacuum forming de film sec de seulement 15 μm d'épaisseur. Le moulage est rendu possible par le fait qu'une fois insolés, les films secs ont tendance à mieux résister aux déformations que quand ils ne sont pas insolés.

Enfin, l'enrésinement de wafers avec des gravures profondes débouchantes (figure 6.16a) a été testée avec succès. Il est important de noter que pour ce genre d'enrésinement, le film de protection en polyester ne peut être pelé qu'après insolation, car sinon le film est malléable et déformable. Ceci signifie donc qu'il ne semble pas possible de réaliser des doubles enrésinements au-dessus de gravures profondes sans, au préalable, insoler la résine.

Cependant, la malléabilité des films secs non insolés a été exploitée dans notre département de recherche par Alexandre Houdouin, pour mouler un $\frac{1}{2}$ tore de film sec par vacuum forming (figure 6.16b).

6.2.5 Conclusion

Les films secs de résine ont été testés avec succès lors de gravure DRIE, de dépôt de métal et d'enrésinement sur motifs structurés. Il est certain que ce type de résine ne peut pas complètement remplacer les résines liquides épaisses, mais il permet néanmoins d'obtenir des choses impossibles à réaliser avec des résines liquides.

Pour l'instant quatre inconvénients de la résine MX5015 ont été identifiés :

- des microbulles d'air sont emprisonnées sous toute la surface du film, en particulier au niveau de motifs structurés peu profonds ;
- il est difficile de développer entièrement les motifs de grande surface ;
- les motifs de petite taille ($<20 \mu\text{m}$) adhèrent mal au wafer ;
- les flancs ne sont pas idéaux pour une métallisation.

Cependant, il n'est pas impossible que ces inconvénients disparaissent après une optimisation du procédé en faisant varier la température, la pression et la vitesse d'enrésinement. Ces premiers essais nous ont conduit à modifier la taille des motifs sur les masques finaux pour qu'ils ne soient pas inférieurs à 20 μm .

Le résultat à retenir est la possibilité pour nous d'enrésiner des wafers ayant subi des gravures profondes. Ceci pourrait, par exemple, nous permettre de réaliser deux gravures DRIE profondes séparées pour les miroirs et pour les ressorts, au lieu d'utiliser un contrôle des vitesses de gravure avec des motifs de remplissage temporaires. Une autre application potentielle est la protection du cadre et des ressorts lors de la libération des miroirs par gravure isotrope avec XeF₂.

Pour ces deux applications, il faudra d'abord vérifier que l'adhérence des films est suffisante pour pouvoir mettre sous vide des wafers comportant des poches d'air encapsulé à pression ambiante. De même, il faudra vérifier que l'enrésinement de motifs très fragiles est faisable (par exemple les motifs de remplissage ou la membrane en silicium sous les électrodes ou les miroirs).

Dans l'immédiat, cette résine nous sera utile pour certaines étapes de gravure par RIE et pour protéger le wafer contre la graisse thermique.

Conclusion générale

L'objectif général de la thèse était l'étude des verrous technologiques des Microsystèmes OptoElectroMécaniques (MOEMS) lorsqu'ils sont intégrés 3D. Le champ est vaste, et le sujet a donc été recentré sur la réalisation d'une matrice de quatre filtres Fabry Péroต์ accordables pour servir à la détection d'objets camouflés [Minet 2011a].

Pour rappel, le cahier des charges requérait de concevoir un Fabry Péroต์ ayant une transmittivité d'au moins 80 %, des miroirs avec une réflectance minimale de 55 % entre 550 et 850 nm ; et nous devions en outre exploiter l'ordre d'interférence $m = 3$ en faisant varier le gap d'air entre 825 et 1275 nm. Cette réflectance et ces gaps d'air sont supposés nous donner une largeur à mi-hauteur inférieure à 55 nm avec un intervalle spectral libre supérieur à 180 nm. Cependant, les miroirs doivent avoir une planéité meilleure que 30 nm pic à pic, et le positionnement des miroirs doit être garanti à 10 nm près. Enfin, chaque filtre doit occuper plus de 50 % de la surface de la lentille utilisée pour former l'image sur le capteur vidéo.

En principe, toutes les exigences optiques du cahier des charges sont satisfaites. Cependant, en pratique, le prototype aura des performances inférieures à cause du manque de planéité et de la faible réflectance des miroirs. Mais moyennant certaines optimisations (modification des indices, amélioration de la planéité, réduction de la gamme de longueur d'onde), il devrait être possible d'obtenir des résultats satisfaisants.

Le MOEMS que nous avons proposé repose sur un assemblage de trois wafers :

- un miroir mobile sous forme d'une membrane intégrée sur un wafer en silicium micro-usiné par DRIE ;
- un miroir fixe déposé sur un wafer transparent en borosilicate ;
- un troisième wafer, aussi en borosilicate, pour l'encapsulation de la face arrière du MOEMS.

Le contrôle du gap d'air et du parallélisme des miroirs sont réalisés simultanément par un actionnement électrostatique et par une détection capacitive. L'actionnement et la détection utilisent les mêmes électrodes, il faudra donc superposer une tension AC de faible amplitude (pour la détection capacitive), à une tension DC d'une centaine de volts (pour l'actionnement).

Pour la partie mobile, nous avons choisi d'utiliser un wafer en silicium, car la gravure DRIE du silicium est maîtrisée, et est couramment utilisée en micro-fabrication. De plus, le silicium offre des propriétés mécaniques excellentes, avec une rigidité élevée. Ainsi, structurellement, le miroir mobile est constitué d'un cadre rigide relié au reste du wafer en silicium par des ressorts gravés directement dans son épaisseur. D'un point de vue optique, le silicium étant opaque aux longueurs d'ondes visibles, nous avons choisi de réaliser le miroir mobile avec une membrane semi-réfléchissante et peu absorbante, encastrée sur le cadre rigide en silicium.

Pour simplifier le processus de fabrication, nous avons choisi de déposer le miroir fixe sur un wafer en borosilicate transparent dans le visible. Nous avons utilisé des wafers en borosilicate car leur coefficient de dilatation est proche du silicium. Cette propriété sera utile lors de l'assemblage des wafers par soudure, car celle-ci nécessitera de les chauffer à plusieurs centaines de degrés.

Pour le dimensionnement optique, la transmittance du Fabry Péroto recherchée pour les bandes spectrales sélectionnées étant très élevée (80 %), nous avons choisi d'utiliser des miroirs diélectriques non absorbants. Le dimensionnement des multicouches a nécessité d'introduire une nouvelle formule de transmittance des filtres Fabry Péroto. Quoique rarement utilisée dans la littérature, cette formule est plus générale et prend en compte les différences en réflectance des miroirs, et le déphasage à la réflexion. Cette nouvelle formule de transmittance nous a permis d'identifier les principaux leviers et contraintes à considérer lors de la conception d'un filtre Fabry Péroto ayant un faible gap d'air. En particulier, nous avons dû faire attention à l'écart en réflectance des deux miroirs, et au déphasage à la réflexion :

Pour contrôler les réflectances des miroirs, nous avons utilisé deux combinaisons différentes de couches pour le miroir fixe et pour le miroir mobile, car la combinaison $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ (utilisée sur le miroir mobile) ne nous permet pas de dépasser 50 % de réflectance. La combinaison ZnS/YF_3 déposée sur le miroir fixe nous permet d'atteindre au maximum 80 % de réflectance, mais nous avons dû développer un miroir à seulement 58.9 % pour ne pas avoir un trop grand écart de réflectance entre les deux miroirs, car plus cet écart est élevé, plus la transmittance sera faible.

miroir	réflectance	épaisseur	Nbr. couches	matériaux	dépôt
fixe	58.9	894.4	12	ZnS/YF_3	SAGEM REOSC
mobile	50.2	1393.52	12	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$	IEF par PECVD

Le déphasage à la réflexion a pour conséquence de diminuer la valeur du gap d'air entre les deux miroirs. Nous avons trouvé que pour un même gap d'air, plus la variation de déphasage en fonction de la longueur d'onde est importante, plus le Fabry Péroto fonctionnera à un ordre d'interférence élevé. Cet effet sera intéressant à utiliser lorsque les gaps d'air deviendront trop importants pour pouvoir être réalisés par micro-usinage. De

plus, nous avons remarqué que dans toute la gamme de longueurs d'onde certaines valeurs, comme la largeur à mi-hauteur, pourraient devenir constantes (voire même baisser) en ajustant le déphasage des miroirs, sans toucher à leur réflectance. L'ajustement du déphasage sera difficile à réaliser, car il faut tenir compte du déphasage moyen des deux miroirs, mais cela nous offre des possibilités de conception supplémentaires.

Deux dimensionnements de miroirs ont été étudiés ; le dimensionnement retenu en fin de thèse utilise un déphasage à la réflexion continu et quasi constant sur toute la gamme de longueurs d'onde. Cette combinaison de miroirs peut être assimilée au Fabry Péroต์ demandé par le cahier des charges, à condition de soustraire 325 nm au gap d'air. Les performances optiques attendues pour ce filtre sont listées dans le tableau ci-dessous :

ordre $m = 3$ ($m' = 1$)	finesse	ISL	FWHM	T_{\max}	T_{\min}
moyen	5.2±0.1	214.4±29.2	44.1±4.6	94.1±0.7	8.2±0.4
min	3.9	185.2	30.5	-	-
max	8.9	271.7	49.2	-	-

Pour le dimensionnement électromécanique, le dessin de la structure a surtout été contraint par l'exigence de compacité figurant au cahier des charges. Pour la satisfaire, nous avons choisi une géométrie triangulaire, avec des ressorts gravés dans l'épaisseur du wafer. Cependant, pour que les déformations du cadre et des électrodes restent minimales (< 13 nm lors d'un déplacement de 4 μm), il a fallu utiliser des ressorts d'un centimètre de long.

Les performances électromécaniques attendues de la structure supportant les miroirs mobiles sont listées dans le tableau ci-dessous :

gap électrode (μm)	12-8 μm
gap d'air physique miroirs (μm)	4.5-0.5 μm
gap d'air utile pour l'accordabilité (μm)	0.50 -0.95
gap d'air pour compensation des accélérations (μm)	0.25
gap d'air pour ajustement parallélisme (μm)	3.3
déformée cadre (4 μm déplacement) (nm)	11.9-13.1
déformée bord cadre (4 μm déplacement) (nm)	8.8-9.0
déformée électrodes (4 μm déplacement) (nm)	11.9-13.1
Fres (mode 1 à 6) (kHz)	2.131-4.671
tension actionnement max (V)	122-143.9
couverture lentilles (%)	69-75

La géométrie obtenue présente deux inconvénients :

Premièrement, les six premiers modes de résonance n'ont pas pu être repoussés au delà de 10 kHz. Cependant, l'amortissement gazeux et l'asservissement du gap d'air devraient permettre de minimiser, voire d'éliminer les problèmes posés par les faibles fréquences de résonance.

Deuxièmement, les tensions maximales d'actionnement seront élevées (120-145 V). Cependant, si l'assemblage des wafers peut être réalisé de manière reproductible, nous pourrions diminuer les marges prises pour les gaps d'air initiaux, et donc les tensions d'actionnement seront plus faibles.

La structure à réaliser étant difficile à fabriquer, la majeure partie de la thèse a été consacrée au développement de nouvelles techniques de fabrication principalement pour le miroir mobile.

Ainsi, pour la fabrication de membranes diélectriques $\text{Si}_x\text{N}_y\text{H}_z/\text{Si}_x\text{O}_y\text{H}_z$ déposés par PECVD, nous avons étudié le contrôle des contraintes résiduelles par recuit à 700-800 °C de différents multicouches. Ces recuits nous ont permis d'obtenir des multicouches en tension de manière reproductible, à condition d'avoir un recuit suffisamment long. L'avantage des recuits est que les valeurs des indices et des épaisseurs des couches varient peu. Donc, nous pourrions envisager dans une seconde version du MOEMS d'ajuster de manière indépendante les contraintes résiduelles et les paramètres de dépôt PECVD (indices, vitesses de dépôt).

Le seul gros problème rencontré pendant ces essais a été la formation de trous pour les recuits au delà de 550 °C. Ce problème a été résolu en déposant la silice en premier. Cependant, pour les cas où il faut déposer le nitrure en premier, nous avons identifié deux solutions possibles (non testées) : traitement par plasma NH_3 du wafer avant dépôt, ou recours à une combinaison de dépôts PECVD HF/LF pour que le recuit du multicouche puisse être fait à moins de 550 °C. La prévision des contraintes résiduelles à partir du recuit des monocouches n'a pas bien fonctionné, mais nous pensons qu'avec un recuit sur une durée supérieure à 10 heures et comportant une rampe lente de montée en température, cela deviendra envisageable.

Dans le procédé de fabrication, les miroirs mobiles sous forme de membranes sont libérés par une gravure DRIE suivie d'une gravure XeF_2 . Cette méthode nous a permis d'atteindre un rendement très élevé de 100 % sans risque d'endommager les miroirs, ce qui est un avantage, car les structures dessinées sont si larges que nous n'avons pu mettre, sur chaque wafer, plus de quatre matrices composées chacune de quatre filtres Fabry Péro.

Le point le plus critique et le plus complexe à satisfaire du cahier des charges est la planéité des membranes. Nous avons trouvé qu'un modèle mathématique simple, utilisant une minimisation du Laplacien de la surface de la membrane, permet de reproduire les déformations de 15-163 nm qui ont été mesurées par interférométrie sur des membranes de 1 à 6 mm de diamètre. Ce modèle nous a montré que la planéité des membranes dépendra principalement des déformations du cadre rigide. Ainsi, pour minimiser les défauts de planéité des miroirs, il faudra sélectionner les wafers les plus plans (rayon de courbure supérieur à 105 m), et utiliser un multicouche faiblement contraint en tension (< 40 MPa).

Le procédé de fabrication des membranes est robuste, mais leur intégration sur la structure mobile en silicium est rendue complexe du fait du nécessaire contrôle des vitesses de gravure de la DRIE et des protections à prévoir pour l'utilisation d'une gravure isotrope par XeF₂. Une partie des difficultés ont cependant pu être résolues pendant la thèse :

Premièrement, les exigences de compacité nécessitent de ralentir la vitesse des gravures DRIE sous les miroirs et sous les électrodes. Ce problème a été résolu avec des motifs de remplissage. Nous avons étalonné les vitesses de gravure pour deux types de motifs de remplissage : les piliers et les grilles.

Les piliers sont simples à utiliser, car ils peuvent facilement paver une surface, mais pour la matrice de filtres, ces motifs ne permettent pas de ralentir suffisamment les vitesses de gravure. Ils ne seront utilisables que si les tranchées ont une largeur supérieure à 100 µm.

Les grilles permettent un meilleur contrôle des vitesses de gravure, et seront utilisables avec des tranchées de 30 à 100 µm de large. Mais le pavage à l'aide de motifs de remplissage sous forme d'hexagones réguliers est difficile à mettre en œuvre, c'est pourquoi nous proposons des motifs de remplissage sous forme de tranchées ou de polygones irréguliers de surfaces identiques, obtenus à l'aide d'un algorithme de maillage. Dans notre cas, l'utilisation de tranchées est possible (car les surfaces à paver sont simples), et présente le minimum de risques. Le pavage par polygones irréguliers sera à réserver aux cas où les formes à paver seront complexes.

Deuxièmement, nous avons mis au point différentes techniques permettant de protéger les ressorts et le cadre rigide pendant l'étape de gravure isotrope par XeF₂. On pourra soit utiliser une couche de PTFE structurée à l'aide d'un pochoir aligné mécaniquement, soit utiliser des films de résine secs qui offrent l'avantage de pouvoir être utilisés sur des wafers fortement structurés.

La résolution des difficultés rencontrées aux stades de la conception et de l'expérimentation ne nous a malheureusement pas laissé le temps de fabriquer le MOEMS. Mais les techniques de fabrication retenues sont suffisamment au point, et les masques de photolithographie ont déjà été commandés : la fabrication sera donc envisageable dans l'avenir.

Parmi les premières tâches à réaliser, il faudra d'abord tester la fabrication de la structure mobile, car c'est l'étape la plus critique du procédé de fabrication. Par ailleurs, la réalisation de la partie mobile nous permettra de mesurer les déformations du cadre causées par les contraintes résiduelles de la membrane. Ces informations nous permettront de mettre en place des modèles fiables qui nous permettront d'optimiser la forme du cadre.

Ensuite, il faudra mettre au point l'assemblage des trois wafers, lequel nécessite d'utiliser des cales d'environ 4-5 µm d'épaisseur. La précision des gaps d'air obtenus par l'assemblage doit ensuite être évaluée, pour savoir s'il faut augmenter ou diminuer le gap d'air initial entre les électrodes.

De manière plus large, certaines techniques de fabrication mises au point au cours de cette thèse sont désormais utilisées dans d'autres projets au sein du département. Par exemple, les films de résine secs sont utilisés pour fabriquer des canaux de micro-fluidique ou pour obtenir des membranes moulées par vacuum-forming. De même, l'alignement mécanique du pochoir et l'expérience acquise dans la réalisation des miroirs déposés par PECVD seront utilisés dans la fabrication d'un micro-interféromètre de type Mirau.

Mais le point le plus intéressant soulevé par cette thèse serait de trouver une méthode permettant d'obtenir à chaque fois une membrane suffisamment plane pour réaliser des filtres Fabry Pérot. Pour le moment la solution retenue est de sélectionner les wafers les plus plats, et d'utiliser une contrainte résiduelle très légèrement en tension. Cette méthode fonctionnera, mais elle n'est ni commode, ni rentable, car elle peut nécessiter de mettre à l'écart un grand nombre de wafers pour en trouver qui aient une planéité suffisante. Le simple fait de trouver une solution à ce problème constituerait déjà une belle avancée dans la réalisation de filtres Fabry Pérot accordables micro-usinés, car ce défaut de planéité des miroirs n'a (à notre connaissance) pas encore été résolu.

Annexes

A Modèle analytique de la transmittance d'un filtre Fabry Pérot dissymétrique

Pour réaliser la matrice de filtres il a été nécessaire d'utiliser deux miroirs de réflectance différente. De plus, les miroirs sont constitués d'un empilement de diélectriques non absorbants qui introduisent un déphasage supplémentaire, qui s'ajoute au déphasage obtenu par réflexions multiples dans la cavité. Il a donc été nécessaire de recalculer la transmittance des cavités Fabry Péro pour prendre en compte d'une part le déphasage à la réflexion introduit par les multicouches, et d'autre part les différences en réflectance.

Pour traiter le problème, le champ électrique incident est exprimé sous la forme $E_0 e^{i(kx - \omega t)}$ d'amplitude E_0 , avec une pulsation $\omega = 2\pi/\lambda$, pour le temps t , un nombre d'onde $k = 2\pi/\lambda$, avec λ la longueur d'onde incidente et x la distance de propagation.

On considère le cas de la figure A.1, où trois milieux différents sont présents : le milieu incident d'indice n_1 , le milieu entre les miroirs d'indice n_2 et le milieu de sortie d'indice n_3 . Ainsi, dans chacun des milieux on a trois angles différents : le faisceau arrive sur le premier miroir avec un angle θ , il se propage dans la cavité avec un angle α , et est transmis dans le dernier milieu avec un angle γ . Les trois angles θ , α et γ sont reliés entre eux par la relation de Snell-Descartes : $n_1 \sin(\theta) = n_2 \sin(\alpha) = n_3 \sin(\gamma)$.

Les miroirs sont physiquement séparés d'une distance physique d et ont respectivement une réflectance R_1 et R_2 , ainsi qu'un décalage de phase à la réflexion ϕ_1 et ϕ_2 .

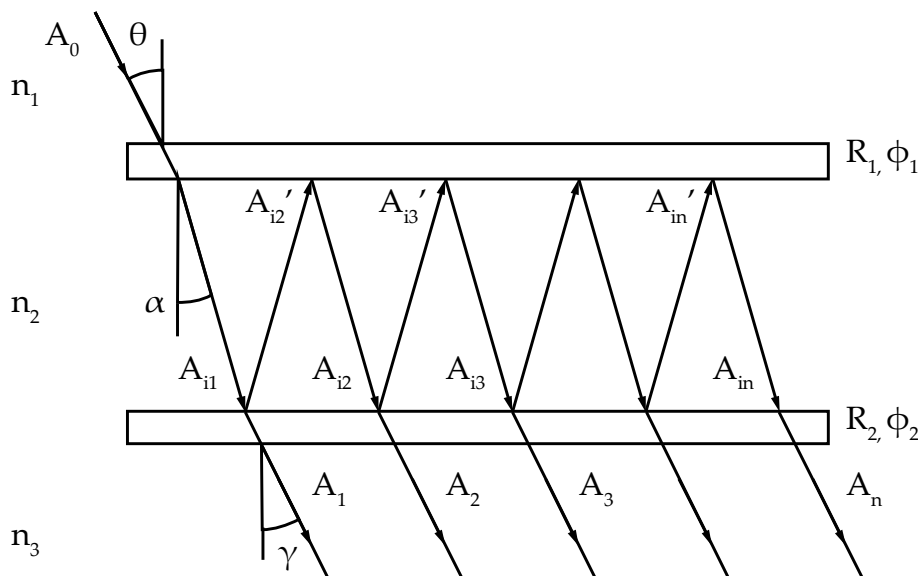


Figure A.1 : Schéma de la cavité Fabry Péro avec les réflexions multiples entre les deux miroirs.

Le calcul de la transmittance est séparé en deux parties : le calcul de l'amplitude et le calcul du déphasage.

Pour le calcul de l'amplitude, le faisceau incident a une intensité $I_0 = E_0 E_0^* = A_0^2$. Après avoir traversé le premier miroir, l'amplitude a pour expression :

$$A_{i1} = A_0 \sqrt{1 - R_1}$$

Les amplitudes des faisceaux réfléchis dans la cavité ont pour expression :

$$A_{i2} = A_{i1} \sqrt{R_2}$$

$$A_{i2} = A_{i2} \sqrt{R_1} = A_0 \sqrt{R_1 R_2} \sqrt{1 - R_1}$$

$$A_{i3} = A_{i2} \sqrt{R_2}$$

$$A_{i3} = A_{i3} \sqrt{R_1} = A_0 \sqrt{R_1^2 R_2^2} \sqrt{1 - R_1}$$

....

$$A_{in} = A_0 \sqrt{(R_1 R_2)^{n-1}} \sqrt{1 - R_1}$$

A travers le second miroir, les amplitudes des faisceaux transmis ont pour expression :

$$A_1 = A_{i1} \sqrt{1 - R_2} = A_0 \sqrt{(1 - R_1)(1 - R_2)}$$

$$A_2 = A_{i2} \sqrt{1 - R_2} = A_0 \sqrt{R_1 R_2 (1 - R_1)(1 - R_2)}$$

$$A_3 = A_{i3} \sqrt{1 - R_2} = A_0 \sqrt{(R_1 R_2)^2 (1 - R_1)(1 - R_2)}$$

....

$$A_n = A_{in} \sqrt{1 - R_2} = A_0 \sqrt{(R_1 R_2)^{n-1} (1 - R_1)(1 - R_2)}$$

Pour le calcul du déphasage entre les différents faisceaux, nous avons la somme de deux déphasages :

- un déphasage introduit lors de la réflexion sur les miroirs et lors des réflexions multiples au sein de la cavité $\delta_1 = 2kdn_2 / \cos(\alpha) - \varphi_1 - \varphi_2$;
- un second déphasage, à retrancher du premier, qui a lieu en dehors de la cavité $\delta_2 = 2kdn_3 \tan(\alpha) \sin(\gamma)$. Ce second déphasage n'intervient que pour le cas où l'angle de sortie γ est non nul.

Ainsi le déphasage entre les rayons 1-2, 2-3, ... vaut :

$$\delta = 2kdn_2 / \cos(\alpha) - \varphi_1 - \varphi_2 - 2kdn_3 \tan(\alpha) \sin(\gamma)$$

En utilisant la relation de Snell-Descartes on trouve :

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{2kdn_2}{\cos(\alpha)} - \varphi_1 - \varphi_2 - 2kdn_3 \tan(\alpha) \sin(\alpha) \\ &= \frac{2kdn_2}{\cos(\alpha)} (1 - \sin^2(\alpha)) - \varphi_1 - \varphi_2 \\ &= \frac{2kdn_2}{\cos(\alpha)} (1 - \sin^2(\alpha)) - \varphi_1 - \varphi_2 \\ &= 2kdn_2 \cos(\alpha) - \varphi_1 - \varphi_2 \\ &= 2kdn_2 \cos\left(\arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin(\theta)\right)\right) - \varphi_1 - \varphi_2 \end{aligned}$$

Ainsi, après réflexion sur chacun des deux miroirs, le déphasage entre les faisceaux 1-2, 2-3, ..., n-(n-1) vaut :

$$\delta = 2kdn_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin(\theta)\right)^2} - \varphi_1 - \varphi_2$$

δ : Décalage de phase après réflexion sur les deux miroirs
 φ_1, φ_2 : Décalages de phase à la réflexion des deux miroirs
 $k = 2\pi/\lambda$: Nombre d'onde avec λ la longueur d'onde incidente
 d : Distance physique entre les deux miroirs
 n_1, n_2 : Indice respectif du milieu incident et du milieu entre les deux miroirs
 θ : Angle incident

Il est intéressant de remarquer que le déphasage ne dépend que des indices du milieu incident et du milieu entre les miroirs, le déphasage ne dépend plus du milieu de sortie.

Ainsi on trouve l'expression du champ électrique en sortie du Fabry Péro :

$$\begin{aligned} E_1 &= A_1 \exp(i(kx - \omega t)) \\ E_2 &= A_2 \exp(i(kx - \omega t + \delta)) \\ E_3 &= A_3 \exp(i(kx - \omega t + 2\delta)) \\ &\dots \\ E_n &= A_n \exp(i(kx - \omega t + (n-1)\delta)) \end{aligned}$$

La somme de tous ces champs donne :

$$\begin{aligned} E_{tot} &= \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(i(kx - \omega t + (n-1)\delta)) \\ &= A_0 \sqrt{(1-R_1)(1-R_2)} \exp(i(kx - \omega t)) \sum_{n=1}^{\infty} \left[\sqrt{(R_1 R_2)} \exp(i\delta) \right]^{n-1} \end{aligned}$$

C'est une série géométrique ce qui donne :

$$E_{tot} = A_0 \sqrt{(1-R_1)(1-R_2)} \exp(i(kx - \omega t)) \frac{1 - \left[\sqrt{(R_1 R_2)} \exp(i\delta) \right]^{n-1}}{1 - \sqrt{(R_1 R_2)} \exp(i\delta)}$$

et pour $n \rightarrow \infty$ on obtient :

$$E_{tot} = A_0 \sqrt{(1-R_1)(1-R_2)} e^{i(kx - \omega t)} \frac{1}{1 - \sqrt{(R_1 R_2)} e^{i\delta}}$$

La valeur de l'intensité transmise I_T vaut :

$$\begin{aligned} I_T &= EE^* \\ &= \frac{I_0 (1-R_1)(1-R_2)}{\left(1 - \sqrt{R_1 R_2} e^{i\delta}\right) \left(1 - \sqrt{R_1 R_2} e^{-i\delta}\right)} \\ &= \frac{I_0 (1-R_1)(1-R_2)}{1 - \sqrt{R_1 R_2} (e^{i\delta} + e^{-i\delta}) + R_1 R_2} \\ &= \frac{I_0 (1-R_1)(1-R_2)}{1 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos(\delta) + R_1 R_2} \\ &= \frac{I_0 (1-R_1)(1-R_2)}{1 - 2\sqrt{R_1 R_2} (1 - 2\sin^2(\delta/2)) + R_1 R_2} \end{aligned}$$

Cette formule peut encore se simplifier en développant le numérateur et le dénominateur et en rajoutant au numérateur $2\sqrt{R_1R_2} - 2\sqrt{R_1R_2}$.

On obtient ainsi la formule de transmittance $T = I_T/I_0$ pour un Fabry Péroet dissymétrique, prenant en compte le décalage de phase à la réflexion et la réflectance de chaque miroir :

$$T = \left[1 - \frac{(\sqrt{R_1} - \sqrt{R_2})^2}{(1 - \sqrt{R_1R_2})^2} \right] \frac{1}{1 + \frac{4\sqrt{R_1R_2}}{(1 - \sqrt{R_1R_2})^2} \sin^2 \left(kdn_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin(\theta) \right)^2} - \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right)}$$

R_1, R_2 : Réflectance respective des deux miroirs

φ_1, φ_2 : Décalages de phase à la réflexion des deux miroirs

$k = 2\pi/\lambda$: Nombre d'onde avec λ la longueur d'onde incidente

d : Distance physique entre les deux miroirs

n_1, n_2 : Indices respectifs du milieu incident et du milieu entre les deux miroirs

θ : Angle incident

B Caractérisation des films par ellipsométrie

Les constantes optiques et l'épaisseur des films individuels de silice et de nitrure de silicium déposés par PECVD ont systématiquement été mesurés par ellipsométrie monochrome à la longueur d'onde $\lambda = 632.8$ nm avec un ellipsomètre PLASMOS SD3200. Quelques mesures de la dispersion de l'indice de réfraction optique de ces films ont également été effectuées par ellipsométrie spectroscopique avec un ellipsomètre WOOLLAM SD2000. Ce dernier système a également été utilisé pour caractériser la transmittance de quelques membranes multicouches. Cet annexe rappelle brièvement le principe de l'ellipsométrie et précise les conditions de mesure et d'analyse des résultats.

B.1 Principe de l'ellipsométrie

L'ellipsométrie repose sur la mesure du changement d'état de polarisation d'un faisceau lumineux lorsqu'il est réfléchi sur la surface de l'échantillon sous incidence oblique (figure B.1).

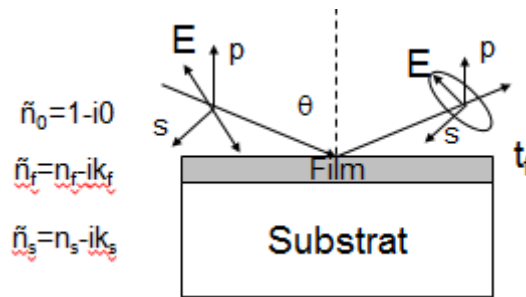


Figure B.1 : Principe de l'ellipsométrie.

Le changement d'état de polarisation est mesuré via le rapport R_p/R_s des composantes du coefficient de réflexion de polarisation parallèle au plan d'incidence et perpendiculaire au plan d'incidence. Ce rapport est un nombre complexe. Il est exprimé en fonction des angles ellipsométriques ψ et Δ par la relation :

$$\frac{R_p}{R_s} = \tan(\psi) \exp(i\Delta) \quad (\text{B.1})$$

$$\begin{aligned} \psi &= f(\theta_m, k_s, t_{fi}, n_{fi}, k_{fi}) \\ \Delta &= g(\theta, \lambda, t_{fi}, n_s, k_s, n_{fi}, k_{fi}) \end{aligned} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (\text{B.2})$$

R_p et R_s sont des fonctions non linéaires qui dépendent des paramètres de mesure (l'angle d'incidence θ , la longueur d'onde λ , et l'indice n_0 du milieu ambiant), et de l'échantillon mesuré (indice optique complexe du substrat ($\tilde{n}_s = n_s - ik_s$), épaisseurs t_{fi} des films, et indices complexes $\tilde{n}_{fi} = n_{fi} - ik_{fi}$ des N différents films constituant l'échantillon).

Les mesures ellipsométriques permettent d'accéder à Ψ et Δ ou à des fonctions trigonométriques de ces angles. Ces valeurs permettent ensuite de déterminer l'indice et l'épaisseur d'un film transparent ($k_f = 0$), lorsque l'on connaît les conditions de mesure et les constantes optiques du substrat sur lequel est déposé le film.

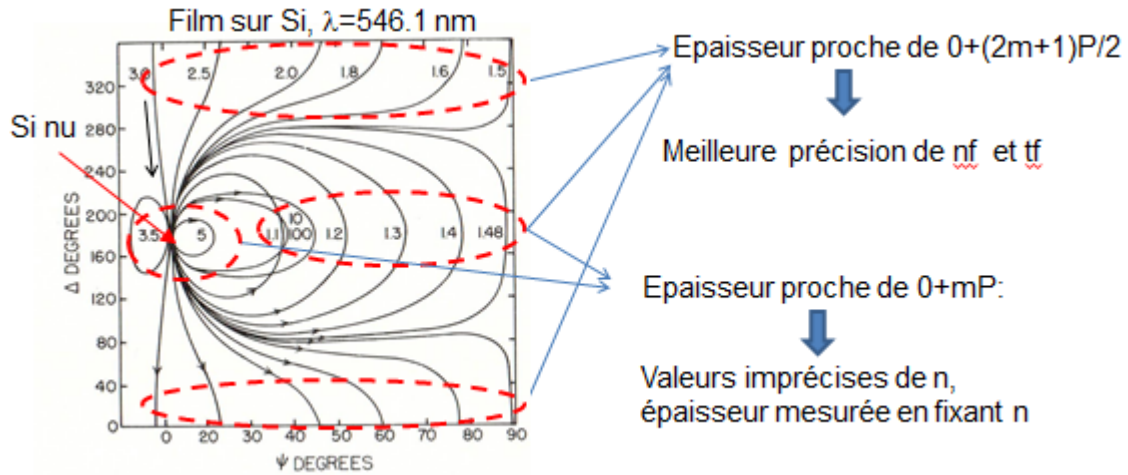


Figure B.2 : Exemple d'abaque Δ - Ψ pour un film transparent sur silicium à $\lambda = 546.1$ nm et zones où la précision est maximum et minimum. Les flèches sur les courbes indiquent le sens de variation avec l'épaisseur du film. Les valeurs à gauche des courbes sont les valeurs d'indice de réfraction du film.

La figure B.2 montre un exemple d'abaque donnant la variation de Ψ et Δ en fonction de l'indice et de l'épaisseur d'un film transparent déposé sur silicium et mesuré à une longueur d'onde de $\lambda = 546.1$ nm. Cet abaque est périodique en fonction de l'épaisseur avec une période dite ellipsométrique que nous noterons P .

Pour une mesure effectuée avec une longueur d'onde et un angle donnés, les mesures de l'indice et de l'épaisseur sont précises si nous sommes au voisinage de $\Delta = 0$ et $\Delta = 360^\circ$ pour des indices élevés (>1.5), et au voisinage de $\Delta = 80^\circ$ et $\Delta = 280^\circ$ pour des indices faibles (<1.5). On peut montrer que ces conditions de mesure idéales correspondent à des épaisseurs t_f du film proches d'un multiple impair de la période ellipsométrique P et données par :

$$t_f = \frac{(2m+1)P}{2} = \frac{2m+1}{2} \frac{\lambda}{2\sqrt{n_f^2 - \sin^2 \theta}} \quad m = 0, 1, \dots \quad (\text{B.3})$$

Où θ et λ sont l'angle d'incidence et la longueur d'onde de mesure et n_f est l'indice de réfraction du film. Pour des épaisseurs de films proches de ces valeurs, l'épaisseur mesurée par ellipsométrie t_{fm} et l'indice du film peuvent être déterminées avec la meilleure précision possible à partir d'une mesure d'ellipsométrie à une seule longueur d'onde si les constantes optiques du substrat sont connues.

Au contraire si l'épaisseur du film est proche d'un multiple de la période ellipsométrique P (Δ voisin de 175°), les courbes sont peu dépendantes de l'indice et seule l'épaisseur peut être mesurée en fixant une valeur approximative de l'indice du film.

Remarque :

L'épaisseur t_{fm} mesurée par ellipsométrie est l'épaisseur réelle du film modulo P soit :

$$t_f = t_{fm} + mP$$

$$= t_{fm} + m \frac{\lambda}{2\sqrt{n_f^2 - \sin^2 \theta}} \quad m = 0, 1, \dots \quad (\text{B.4})$$

Si l'épaisseur du film est approximativement connue à mieux que la période ellipsométrique P près (m connu), l'épaisseur réelle peut être mesurée avec une grande précision.

Le tableau A2-1 donne les valeurs d'épaisseurs optimum des films de silice et de nitrure de silicium pour $m = 0$ à 3 dans le cas d'un angle d'incidence $\theta = 70^\circ$ et d'une longueur d'onde $\lambda = 632.8$ nm.

	Epaisseurs (nm)			
	m = 0	m = 1	m = 2	m = 3
SiO ₂ (n = 1.45)	143.25	429.77	716.29	1002.80
Si ₃ N ₄ (n = 1.95)	92.58	277.76	462.93	648.11

Tableau B.1 : Epaisseurs à déposer pour obtenir une mesure précise des épaisseurs et des indices par ellipsométrie à $\lambda = 632.8$ nm.

Pour tous les étalonnages d'indice et d'épaisseur des films, les épaisseurs déposées ont été choisies proches de ces valeurs. L'indice du silicium à 632,8 nm a été fixé à $\tilde{n}_s = 3.8717 - i0.0158$.

B.2 Mesures par ellipsométrie spectroscopique

En ellipsométrie spectroscopique, la mesure des angles Ψ et Δ est effectuée à plusieurs longueurs d'ondes (et éventuellement pour plusieurs angles d'incidence). Cela permet d'augmenter le nombre d'équations et, potentiellement (par ajustement avec un modèle de milieux stratifiés) de déterminer : l'indice complexe du substrat ; les épaisseurs et indices complexes des différents films. Le nombre d'inconnues est réduit en supposant des lois de dispersion pour les indices de réfraction et les coefficients d'extinction des différents milieux.

Les mesures des indices en fonction de la longueur d'onde des films de silice et de nitrure de silicium PECVD ont été mesurées avec un ellipsomètre spectroscopique à angle variable WOOLLAM M2000. Cet ellipsomètre est un ellipsomètre à modulation de phase qui présente l'avantage d'être très rapide : il permet d'acquérir l'intégralité des mesures sur toutes les longueurs d'ondes en quelques secondes. La gamme de longueurs d'ondes possibles de

mesure est 245-1690 nm. Les mesures ont été effectuées pour un angle de 75° (valeur proche de l'angle de Brewster du silicium nu).

Les résultats de mesure ont été ajustés à l'aide d'un modèle à une couche transparente en prenant pour le silicium les données de référence [Herzinger 1998] dans la base de données du logiciel d'analyse, et en prenant comme loi de dispersion de l'indice du film diélectrique la loi de Cauchy (cf. eq. B.6).

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \quad (\text{B.6})$$

L'ajustement a été réalisé dans la gamme 500-900 nm où les films sont transparents et le substrat en silicium complètement opaque. La qualité de l'ajustement a été évaluée à partir de l'erreur quadratique Moyenne (MSE : Mean Square Error) définie par :

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{3n-m} \sum_{i=1}^n [(N_{E_i} - N_{G_i})^2 + (C_{E_i} - C_{G_i})^2 + (S_{E_i} - S_{G_i})^2]} \times 1000 \quad (\text{B.5})$$

Où n est le nombre de points, m le nombre de paramètres d'ajustement, $N = \cos(2\Psi)$, $C = \sin(2\Psi)\cos(\Delta)$ et $S = \sin(2\Psi)\sin(\Delta)$. Les indices correspondent aux valeurs mesurées (indice E) et modélisées (indice G). Les résultats des ajustements ont été considérés comme satisfaisants lorsque la valeur de MSE est inférieure à 4.

Les résultats des mesures d'indice sont présentés dans la partie 3.1.3.3 (p58), et la transmittance des miroirs mesurée en incidence normale est visible dans la partie 4.5.2 (p130).

C Mesure des contraintes résiduelles par balayage laser

La contrainte résiduelle dans les couches a été mesurée par la méthode du rayon de courbure. Cette méthode repose sur le fait que lorsqu'un film déposé sur un substrat présente une contrainte résiduelle, l'équilibre des forces et des moments conduit à une courbure du wafer qui est proportionnelle à la contrainte. Si le film est mince, la contrainte dans le film peut alors être calculée à partir de la formule de Stoney [Janssen 2009 ; Zhang 2006] :

$$\sigma = \frac{E}{6(1-\nu)} \frac{t_s^2}{t_f} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) \quad (\text{C.1})$$

Avec : σ la contrainte résiduelle, $E/(1-\nu)$ le module d'élasticité biaxial du substrat, t_s l'épaisseur du substrat, t_f l'épaisseur du film, R le rayon de courbure après dépôt, R_0 le rayon de courbure avant dépôt.

L'avantage de cette méthode est de ne pas nécessiter la connaissance des propriétés mécaniques du film déposé, il suffit de connaître son épaisseur. Elle suppose implicitement une libre déformation du substrat pendant le dépôt (pas de clamping), une bonne transmission des déformations à l'interface (film adhérent) et des déformations purement élastiques (pas de création de défauts dans le film ou le substrat). Nous avons supposé que ces conditions étaient vérifiées. En particulier nous avons supposé l'absence de création de défauts cristallins dans le silicium pour la gamme de température de recuit utilisée (jusqu'à 700 °C).

La formule de Stoney montre que la mesure est d'autant plus sensible que l'épaisseur du substrat est faible. C'est pourquoi des wafers 4 pouces et de 300 μm d'épaisseur (inférieure à celle des wafers standard 380-450 μm) ont été utilisés. Cette formule n'est valide que pour un film d'épaisseur $< 2\%$ de l'épaisseur du substrat, et pour une flèche très petite devant l'épaisseur du substrat (régime linéaire) sinon un terme correctif doit être appliqué.

Pour obtenir de bonnes mesures, il faut connaître avec précision le module d'élasticité biaxial du wafer, l'épaisseur du wafer, celle du film et l'évolution du rayon de courbure. :

Pour les substrats du silicium d'orientation cristalline (100) ont été utilisés, le module d'élasticité biaxial intervenant dans la formule de Stoney est indépendant de la direction dans le plan et vaut $E/(1-\nu) = 180,5 \text{ GPa}$ [Brantley 1973].

L'épaisseur des wafers a été mesurée par tomographie optique cohérente dans le domaine proche infrarouge ($\lambda = 1.3 \mu\text{m}$) avec le système MEMSCAN (devenu maintenant le système TMap) de la société Fogale nanotech. Les mesures ont une précision de 0.15 μm et sont effectuées sans contact. En outre, une platine robotisée permet de déterminer les variations

d'épaisseur du wafer. Les expériences ont été réalisées avec des substrats de faible TTV (Total Thickness Variation).

L'épaisseur des films a été mesurée par ellipsomètre mono-longueur d'onde permettant d'atteindre une précision relative de quelques nanomètres ;

Les rayons de courbure avant dépôt (R_0) et après dépôt (R) ont été mesurés par balayage laser avec le système FSM de la société Frontier Semiconductor Measurement. Le logiciel du système FSM500 détermine les rayons de courbure par ajustement linéaire de l'inverse de la dérivée seconde du profil. La mesure du rayon de courbure est donc d'autant plus précise que le balayage est grand. C'est pourquoi nous avons préféré utiliser des wafers de quatre pouces (100 mm de diamètre), plutôt que des wafers deux pouces. En toute rigueur le rayon de courbure est relié au profil $z(x)$ par l'équation (C.2), le résultat n'est donc correct que si $\partial z/\partial x \ll 1$ (faible courbure).

$$\frac{1}{R_x} = \frac{\partial^2 z / \partial x^2}{\left(1 + \left(\partial z / \partial x\right)^2\right)^{3/2}} \quad (\text{C.2})$$

La déformation des wafers sous leur propre poids n'a pas été prise en compte : elle a été considérée comme identique avant et après dépôt. Pour l'ensemble des mesures, la reproductibilité de l'appareil sans repositionnement des wafers a été évaluée, à partir de mesures successives, à ± 0.7 MPa. L'incertitude entre 2 mesures avec repositionnement selon deux directions perpendiculaires a été évaluée à ± 16 MPa. Cette erreur est probablement dominée par l'erreur sur l'évaluation du rayon de courbure initial des wafers qui n'ont pas une déformation initiale sphérique.

D Traitement des analyses FTIR, retrait de la ligne de base

L'évolution avec le recuit des liaisons chimiques dans les films de silice et de nitrure de silicium déposés par PECVD a été caractérisée en transmission par spectrométrie d'absorption infrarouge à transformée de Fourier (FTIR). Dans cette annexe j'explique brièvement le principe de fonctionnement de l'appareil et les conditions de mesure. Je présenterai ensuite les procédures d'analyse mises au point pour nos mesures ; en particulier seront présentées l'identification des pics et la procédure utilisée pour réaliser un retrait automatique de la ligne de base des spectres et procédure expérimentale, en les illustrant avec quelques exemples.

D.1 Principe de la mesure

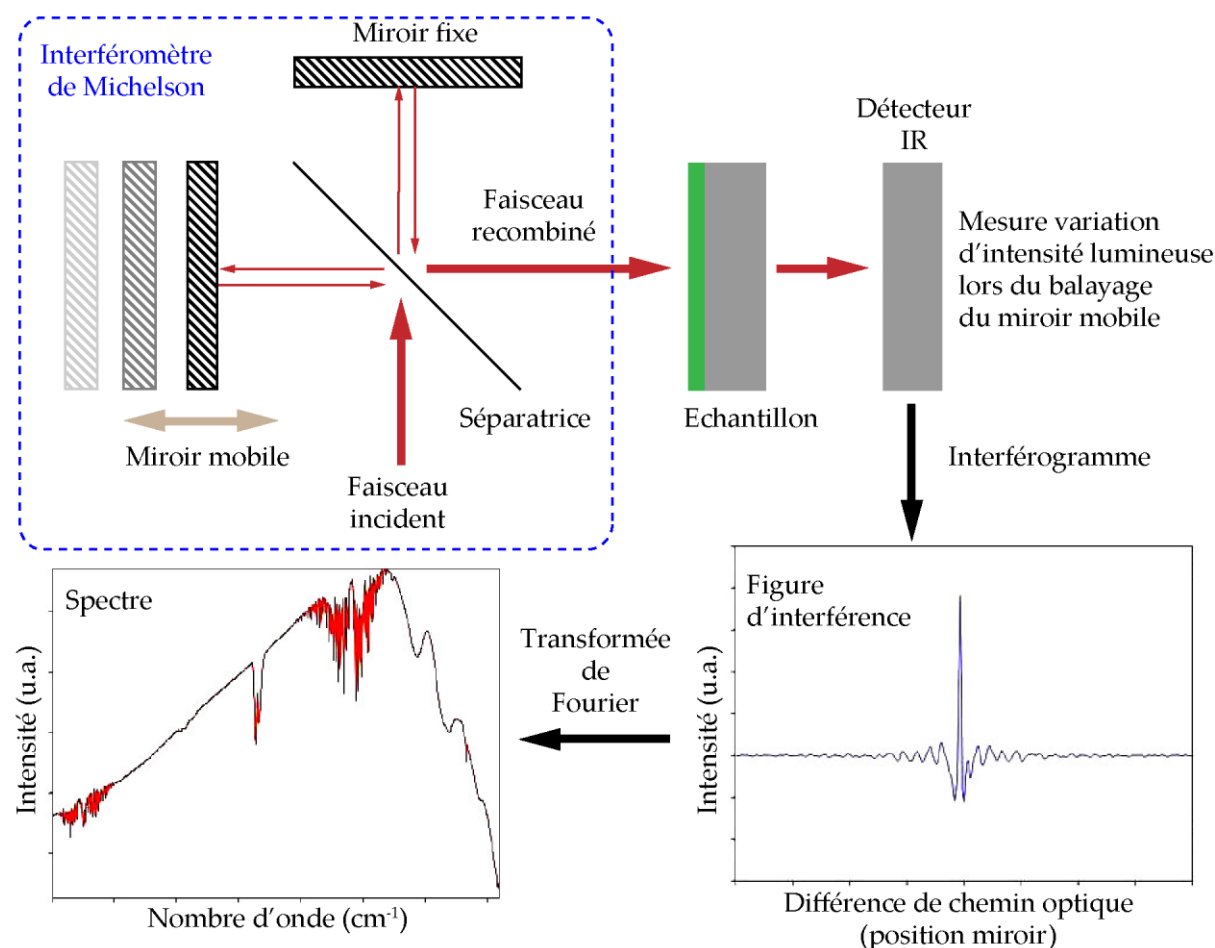


Figure D.1 : Schéma du principe de fonctionnement d'un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier.

La spectrométrie infrarouge repose sur la mesure de l'absorbance de l'échantillon en fonction de la longueur d'onde. Des pics d'absorption sont observés à des énergies lumineuses (exprimées en cm^{-1}) correspondant aux différentes vibrations des liaisons chimiques présentes dans l'échantillon. L'aire des pics est liée à la quantité de liaisons, et la largeur des pics est liée aux variations de la géométrie des liaisons (distances, angles). Cette technique est

bien adaptée à de la caractérisation de liaisons chimiques dans les films diélectriques déposés sur silicium peu dopé, car celui-ci est transparent dans l'infrarouge dès que la longueur d'onde est supérieure à 1.1 μm .

Dans un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier, le spectre est calculé par la transformée de Fourier du signal issu d'un interféromètre de Michelson (voir figure D.1). Une mesure typique se déroule ainsi : une première acquisition, sans échantillon, permet de récupérer le spectre de la source lumineuse ; puis une seconde acquisition est faite en plaçant l'échantillon dans le faisceau lumineux ; enfin le second spectre est soustrait du spectre de la source lumineuse pour obtenir le spectre de l'échantillon.

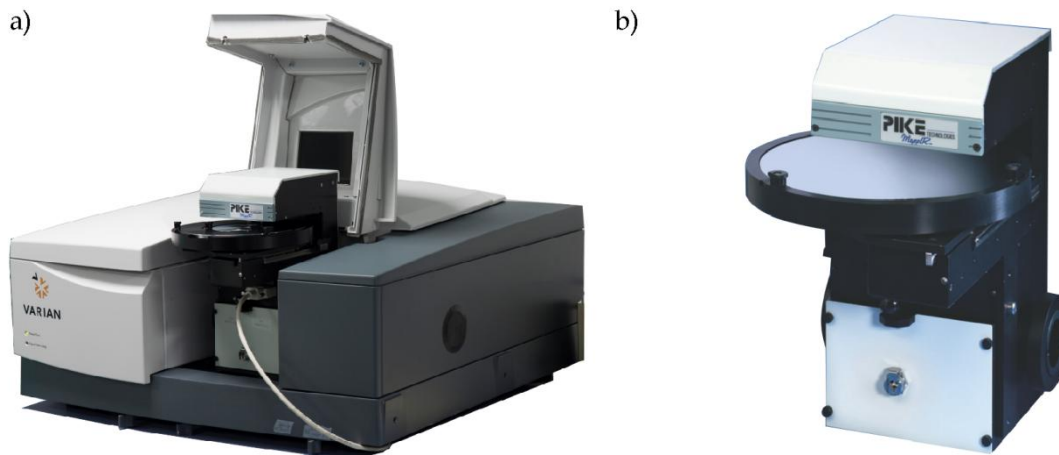


Figure D.2 : a) Photographie du FTIR VARIAN 670 IR avec la table MapIR de marque PIKE montée sur le FTIR.

b) Photographie de la table robotisée MapIR, cet accessoire est utilisé pour acquérir les spectres en transmission ou en réflexion sur les wafers.

Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un FTIR VARIAN 670 IR (cf. figure D.2a). L'échantillon est maintenu en place sous le faisceau infrarouge à l'aide de d'une table MapIR de marque PIKE (cf. figure D.2b). Les mesures ont été effectuées en transmission sur un point au centre du wafer. La table MapIR permet de positionner le point de mesure au même endroit pour chaque échantillon. Les mesures ont été réalisées avec une résolution de 2 cm^{-1} pour un nombre d'onde allant de 400 à 6000 cm^{-1} (ou, exprimé en longueur d'onde, de 1.6 à 25 μm). L'absorbance est exprimée en unité arbitraire (u.a.).

D.2 Retrait de la ligne de base :

Les spectres obtenus résultent des variations de la transmittance de l'échantillon et comprennent des pics superposés à un fond continu (ligne de base). La ligne de base doit être retirée, car elle provient des réflexions multiples dans le substrat, et de la modification de la réflectance du silicium (liée à la couche déposée).

En général la suppression de la ligne de base se fait à la main, mais pour obtenir une mesure précise de l'intensité et de l'aire des pics d'absorption, les spectres ont été exportés dans MATLAB pour être traités avec un programme de retrait automatique de la ligne de base. Ce programme a été écrit pour retirer la ligne de base sur les mêmes portions de courbes pour toutes les mesures, ce qui a permis l'automatisation du traitement de la quarantaine de mesures acquises.

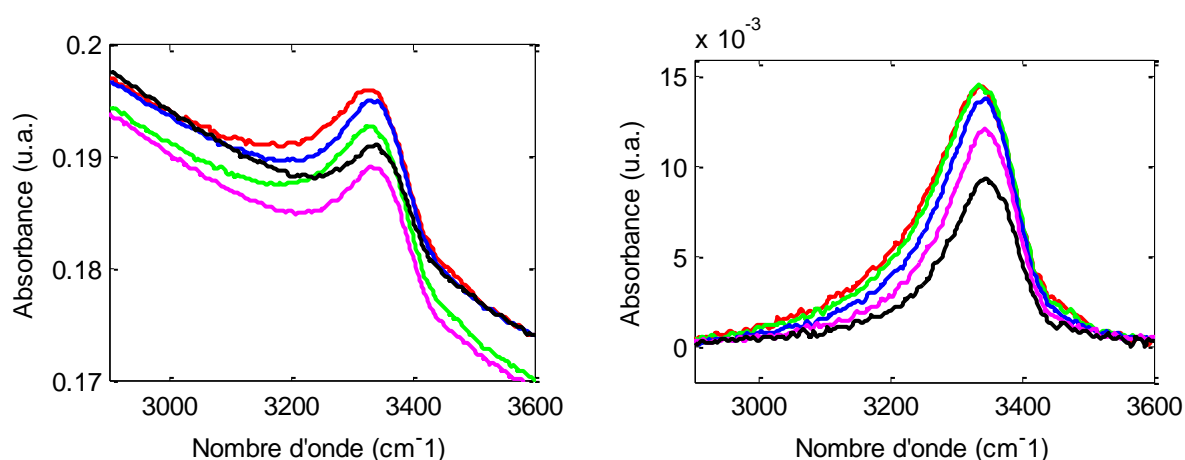


Figure D.3 : Agrandissement d'une mesure FTIR sur le pic N-H pour une couche de LFSIN. A gauche la mesure avec ligne de base, à droite, la mesure sans ligne de base.

L'intérêt du retrait de la ligne de base est illustré dans la figure D.3 pour le cas du pic N-H d'une couche de LFSIN. Cette figure montre à gauche les données brutes mesurées pour différents recuits et à droite les données après retrait de la ligne de base. Le retrait de la ligne de base permet de clairement mettre en évidence la variation de la concentration des liaisons N-H en fonction des températures de recuit. De plus, la forme du pic d'absorbance est différente d'une gaussienne, et indique qu'il y a superposition de plusieurs modes de vibration de liaisons.

Les principales étapes de traitement des spectres pour retirer la ligne de base sont détaillées ci-dessous :

La première étape consiste à sélectionner manuellement les zones contenant uniquement la ligne de base. Par exemple, sur la figure D.4, les zones en rose sont celles qui ont été sélectionnées pour 5 mesures sur la couche de LFSIN.

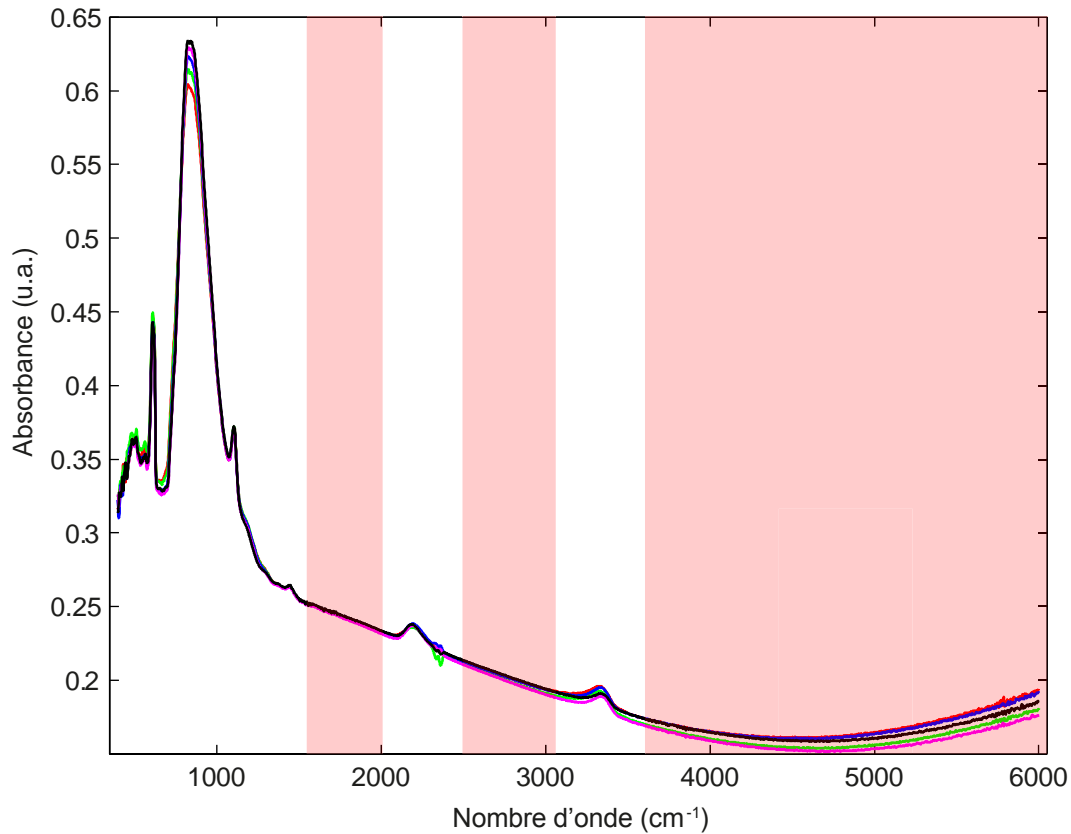


Figure D.4 : Intégralité du spectre obtenu par mesure FTIR pour la couche de LFSIN. Les données sont brutes et la ligne de base n'est pas encore retirée. Les zones en rouge désignent les portions de courbes appartenant à la ligne de base et sur lesquelles l'ajustement est fait.

La seconde étape est l'ajustement d'une ligne de base. Nous avons choisi de faire l'ajustement des différentes zones par une fonction de la forme : $a.x + b.\cos\left(\frac{\pi.(x+c)}{d}\right) + e$. Le résultat de l'ajustement de cette fonction sur les différentes mesures est visible sur la figure D.5.

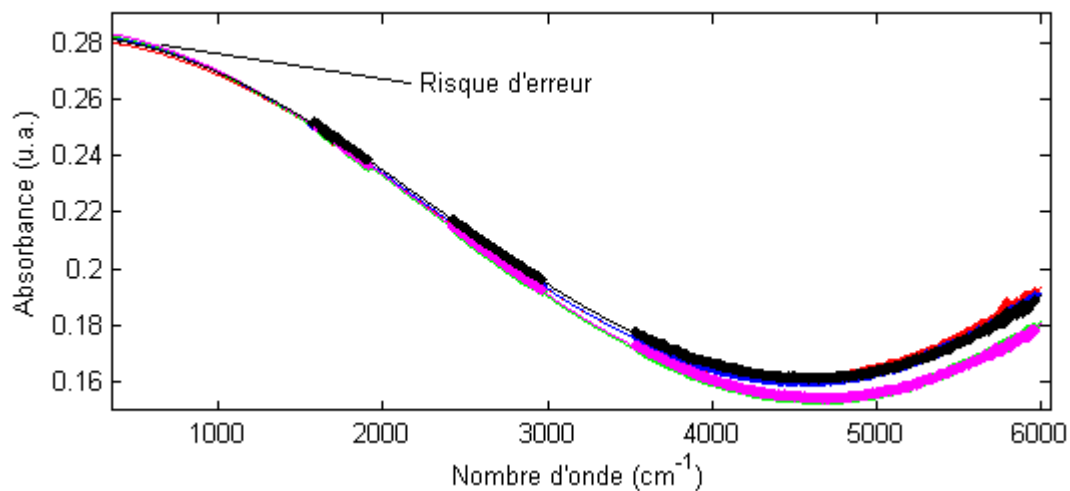


Figure D.5 : Résultat de l'ajustement de courbe sur les portions de courbe sélectionnées.

Enfin à la dernière étape la courbe ajustée est soustraite des mesures pour donner des mesures sans ligne de base (figure D.6) :

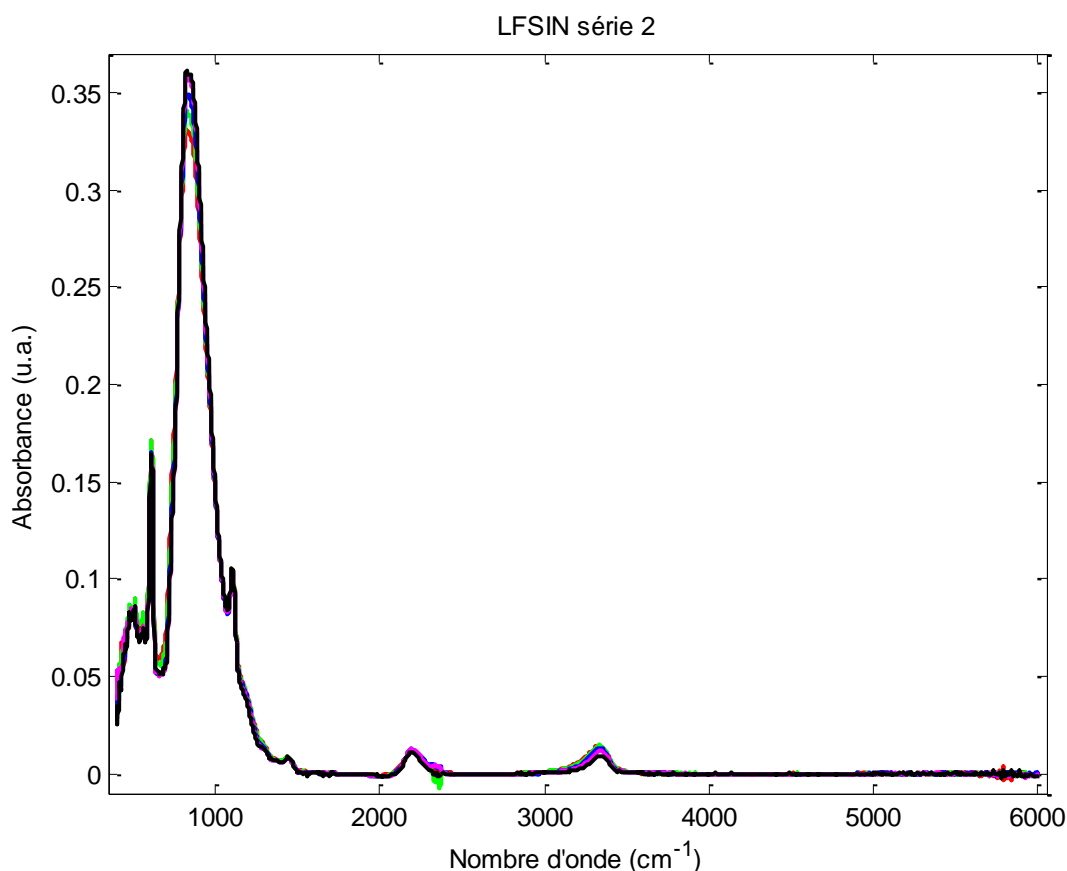


Figure D.6 : Intégralité du spectre obtenu par mesure FTIR pour la couche de LFSIN après retrait de la ligne de base.

Cette procédure n'a été appliquée que pour les pics situés à plus de 1500 cm^{-1} .

Pour les pics situés à moins de 1500 cm^{-1} , nous n'avons pas retiré la ligne de base, car les essais d'extrapolation de la ligne de base n'ont pas donné des résultats satisfaisants. Néanmoins, pour vérifier que la ligne de base n'a pas trop dérivé entre deux mesures, nous avons sélectionné comme références quelques pics pour lesquels l'absorbance ne varie pas en fonction des recuits. Ainsi, pour l'étude des liaisons Si-N dans les films de nitrure de silicium et des liaisons Si-O dans les films de silice, trois pics de référence ont été choisis de manière à encadrer les pics à observer :

- le pic Si-Si à 611 cm^{-1} [Kim]
- le pic à 1105 cm^{-1} , qui sera utilisé uniquement pour la couche de nitrure [Kim]
- le pic à 1444 cm^{-1} , non identifié, présent sur toutes les mesures

Les deux premiers pics ont été sélectionnés à partir d'une analyse des résultats de Kim [Kim], qui montrent que ces pics sont stables jusqu'à 800 °C. Le pic à 1105 cm^{-1} n'étant présent que dans les couches de nitrure le troisième pic à 1444 cm^{-1} (non identifié) est utilisé pour les films de silice.

En conclusion, le retrait automatisé de la ligne de base a donné des résultats différents sur deux régions du spectre :

Pour des pics situés à plus de 1500 cm⁻¹, le résultat est très bon. Le retrait de la ligne de base est facilité par le faible nombre de pics et par une bonne visibilité de la ligne de base. L'analyse de pics ayant une faible absorbance et une faible variation est ainsi rendue possible.

Par contre, pour les pics situés à moins de 1500 cm⁻¹, le retrait de la ligne de base donne des résultats plus difficiles à interpréter. En définitive, seule l'analyse des variations importantes d'absorbance est possible.

D.3 Identification des pics :

Les mesures FTIR peuvent être compliquées à exploiter. En effet, le maximum d'un pic d'absorbance dépend du mode de vibration excité, mais aussi de l'environnement chimique dans lequel se trouve la liaison. Par exemple, pour la couche de nitrure, le pic de N-H situé entre 3300-3500 cm⁻¹, est composé de trois pics superposés : les liaisons N-H...N, N-H, et N-H₂. Ainsi, pour le même type de couche, la position des maximums des pics d'absorbance peut changer d'une publication à l'autre. Une liste assez complète du type de liaisons existantes dans les couches de nitrure, de silice et d'oxynitrure peut être trouvée dans la référence [Ay 2004]. Les valeurs de cet article sont listées ci dessous :

Liaison	Vibration	nombre d'onde (cm ⁻¹)
Si-N	breathing	468-478
Si-H	rocking (bascule)	663-673
Si-N	stretching 1 (étirement)	843-860
Si-N	stretching 2 (étirement)	957-1002
N-H	bending (flexion)	1179-1185
Si-H (N ₂ Si)	stretching (étirement)	2157-2169
Si-H (N ₃)	stretching (étirement)	2220-2250
N-H...N	stretching (étirement)	3290-3297
N-H	stretching (étirement)	3343-3346
N-H ₂	stretching (étirement)	3458-3464

Tableau D.1 : Mode de vibration des liaisons et position des pics d'absorbance infrarouge pour des films de nitrure hydrogéné déposés par PECVD.

Liaison	Vibration	nombre d'onde (cm ⁻¹)
Si-O	rocking (bascule)	446-449 460
Si-O	bending (flexion)	783-826
Si-H	bending (flexion)	884
Si-O	symetric stretching (étirement)	1026-1055
Si-O	asymetric stretching (étirement)	1163-1179
Si-H	streching (étirement)	2258-2265
N-H...N	streching (étirement)	3347-3398
N-H...N	streching (étirement)	3390-3400
H-O-H	streching (étirement)	3493-3542
SiO-H	streching (étirement)	3657-3672 3586-3628

Tableau D.2 : Mode de vibration des liaisons et position des pics d'absorbance infrarouge pour des films de silice hydrogéné déposés par PECVD.

Liaison	Vibration	nombre d'onde (cm ⁻¹)
Si-O	rocking (bascule)	443-449
Si-O	bending (flexion)	815-817
Si-N	streching (étirement)	923-983
Si-O	symetric stretching (étirement)	1018-1044
Si-O	assymetric stretching (étirement)	1130-1167
N-H...N	stretching (étirement)	3341-3358
N-H	stretching (étirement)	3389-3403
H-O-H	stretching (étirement)	3493-3499
SiO-H	stretching (étirement)	3571-3589
SiO-H	stretching (étirement)	3651-3670

Tableau D.3 : Mode de vibration des liaisons et position des pics d'absorbance infrarouge pour des films d'oxynitride hydrogéné déposés par PECVD.

L'objectif des mesures FTIR dans cette thèse n'étant pas d'analyser finement toutes les liaisons chimiques dans les films PECVD, les pics superposés n'ont pas été déconvolués, seuls quelques pics sont intéressants à analyser :

Pour le nitride de silicium, (cf. figure D.7) les pics qui ont été analysés sont :

- l'ensemble des liaisons Si-N à environ 820-840 cm⁻¹
- les liaisons Si-H à environ 20170-2200 cm⁻¹
- l'ensemble des liaisons N-H à environ 3330-3340 cm⁻¹

Pour la silice, (cf. figure D.8) les pics qui ont été analysés sont :

- l'ensemble des liaisons Si-O à environ 1050-1070 cm⁻¹
- les deux pics O-H à environ 3400 et 3650 cm⁻¹

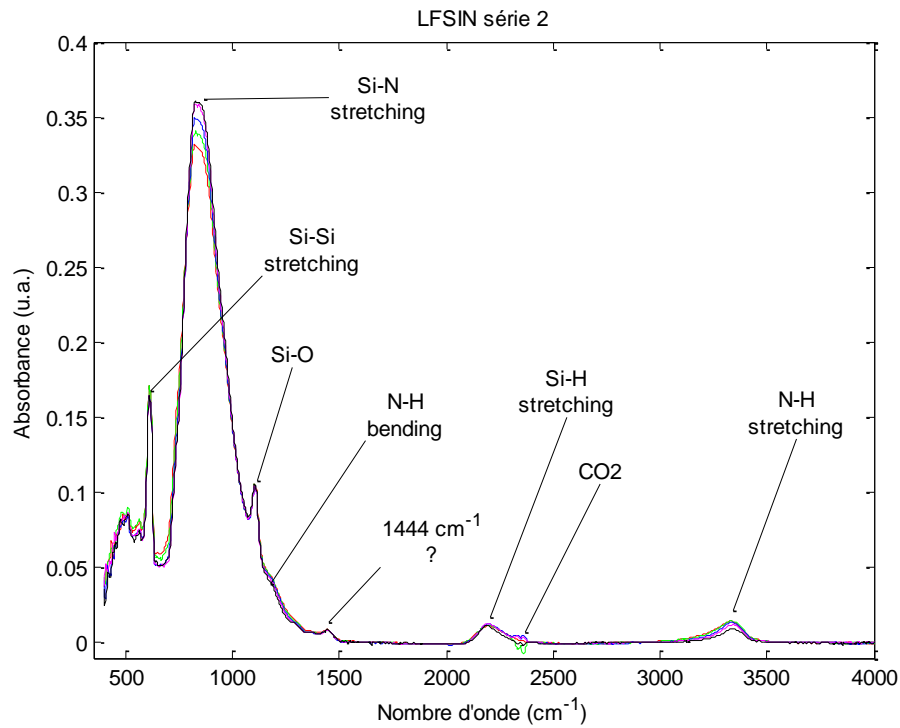


Figure D.7 : Identification des pics présents sur les mesures FTIR des couches de nitrure après retrait de la ligne de base.

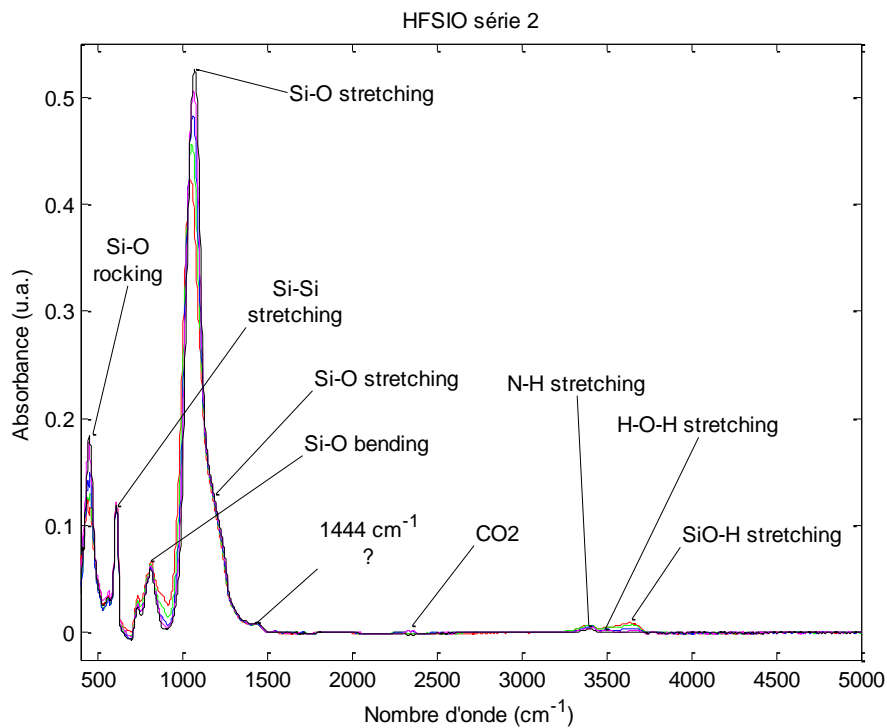


Figure D.8 : Identification des pics présents sur les mesures FTIR des couches de silice après retrait de la ligne de base.

E Filtres Fabry Péroต์ accordables en technologie SOI

La première version de la matrice de filtres Fabry Péroต์ accordables étudiée pendant la thèse était une version exploitant des wafers silicium sur isolant (SOI). Les wafers SOI (silicon on insulator) sont composés d'une fine couche de silice (inférieur à 2-3 μm d'épaisseur) séparant deux couches en silicium. Les épaisseurs des différentes couches sont choisies en fonction de l'application désirée. La couche en silice permet d'isoler électriquement les deux couches en silicium et est couramment utilisée comme couche sacrificielle lors de la fabrication de structures mobiles.

Dans cette annexe nous présentons les travaux réalisés sur le procédé de fabrication en technologie SOI. Dans la suite, nous appellerons substrat en silicium la couche épaisse du wafer SOI, et silicium la fine couche de silicium du wafer SOI.

E.1 Raisons choix version SOI

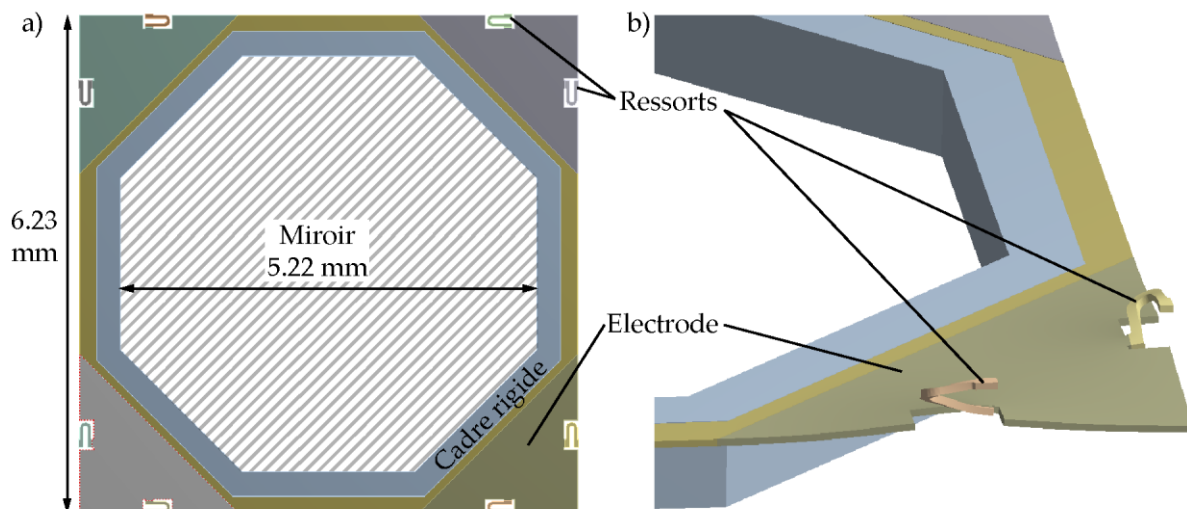


Figure E.1 : a) Vue de dessus du miroir mobile envisagé pour la version SOI.
b) Vue de profil de la géométrie déformée par l'actionnement électrostatique.

Chronologiquement, cette version est la première à avoir été conçue. Comparée à la version présentée dans le corps de la thèse, cette version sur SOI utilise un procédé de fabrication qui est beaucoup plus complexe et qui comporte plus de risques.

L'utilisation de wafers SOI est habituelle dans le domaine des microsystèmes électromécaniques (MEMS), mais la principale raison de ce choix provient du fait qu'au début du projet, le MOEMS devait être conçu pour intégrer plus de quatre filtres Fabry Péroต์ en face du capteur d'imagerie (par exemple 9 ou 16). Donc, pour obtenir une géométrie très compacte qui ne débord pas de la portion du CMOS attribuée à chaque filtre, nous avons choisi une structure carrée avec des miroirs octogonaux (cf. figure E.1a). L'avantage d'un wafer SOI provient de sa fine couche de silicium, car son épaisseur est bien contrôlée. Cette couche nous permet donc de fabriquer des ressorts qui sont beaucoup plus courts et moins encombrants (240x60 μm) que sur la version présentée dans le corps de la thèse.

E.2 Configuration des électrodes d'actionnement

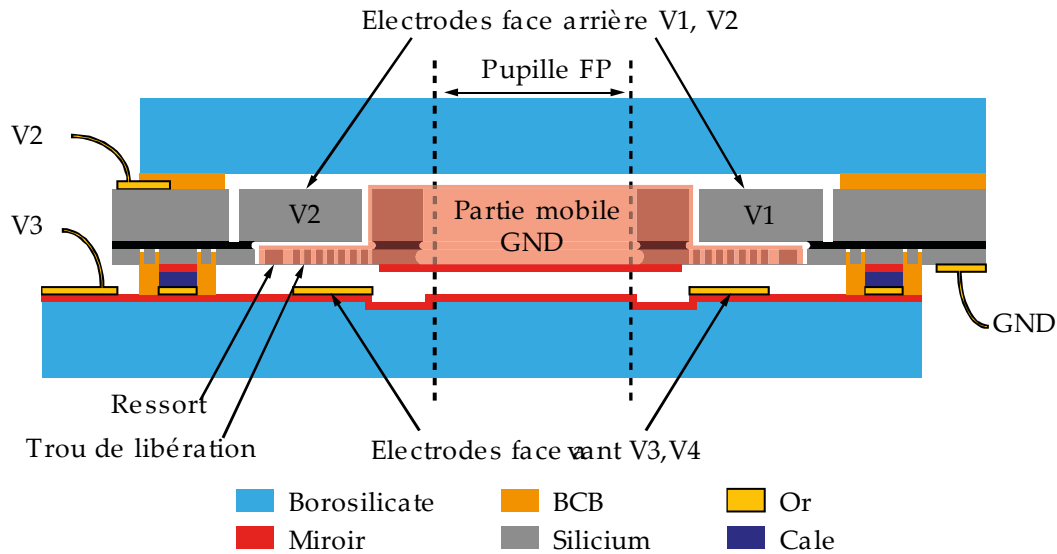


Figure E.2 : Vue en coupe de la version SOI d'un filtre Fabry Pérot accordable.

La figure E.2 montre une vue en coupe de la version SOI du filtre Fabry Pérot accordable. Pour obtenir le déplacement hors plan du miroir mobile, nous avons envisagé de fabriquer les électrodes et les ressorts de la partie mobile (surlignée en rose dans la figure E.2) dans la fine couche de silicium du wafer SOI. La silice enterrée est utilisée comme couche sacrificielle et sa sous-gravure nous permet de libérer la partie mobile.

Pour la répartition des tensions d'actionnement, nous avons choisi de mettre tout le dessus de la partie mobile à la masse (GND). Les autres électrodes d'actionnement V1, V2 (permettant d'ajuster le gap d'air et le parallélisme), ainsi que le cadre rigide, sont gravés dans le substrat en silicium. Cette version suppose bien sûr pour que la résistance électrique du silicium soit suffisamment faible et donc que le wafer SOI soit dopé.

Cependant, à la différence de la version présentée dans le corps de la thèse, l'actionnement de cette structure pourra être rendu bidirectionnel en déposant des électrodes supplémentaires (V3, V4) sur le wafer en borosilicate contenant le miroir fixe. Avoir des électrodes d'actionnement des deux côtés est utile car l'actionnement électrostatique ne fournit qu'une force attractive. De plus, les électrodes situées sur le wafer SOI auront des gaps d'air très faibles (de l'ordre du μm) qui sont très précis, ces électrodes nous permettront ainsi d'utiliser de faibles tensions d'actionnement. En revanche, le faible gap d'air entre électrodes nous impose aussi d'espacer les deux miroirs de manière très précise, car la course d'actionnement disponible sera très faible.

Par rapport à la version en technologie silicium présentée dans le corps de la thèse, l'actionnement bidirectionnel est l'un des avantages de cette version sur SOI. En effet, il devient alors inutile de prévoir un offset de polarisation pour compenser les accélérations parasites. Cependant, sur cette version SOI, tous les plots de connexion n'ont pas pu être mis du même côté de l'assemblage. Les potentiels variables (V1, ..., V4) seront tous du même côté, seule la mise à la masse (GND) de la structure mobile devra être faite sur l'autre face de l'assemblage.

E.3 Procédé de fabrication

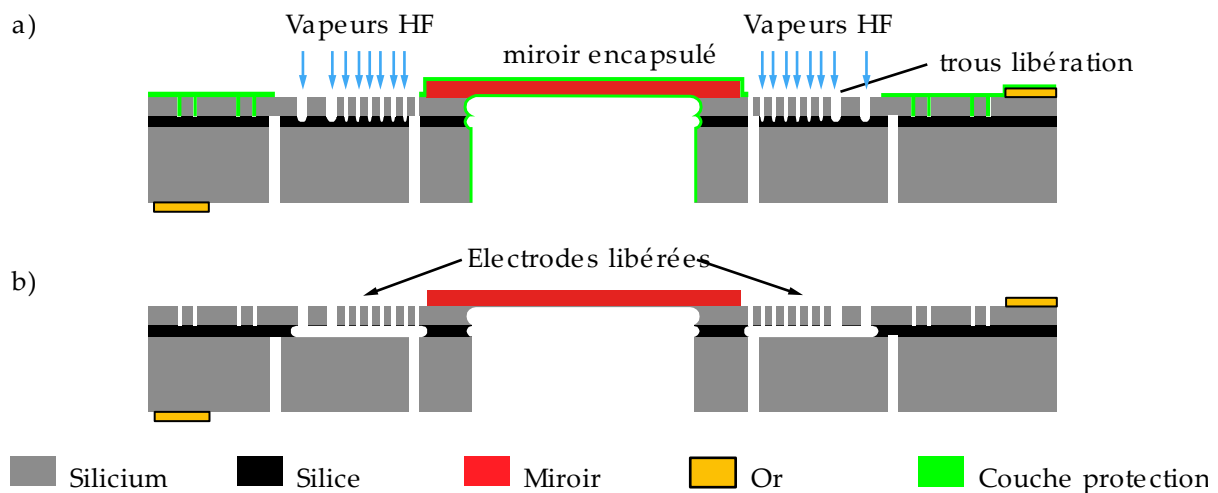


Figure E.3 : a) Vue en coupe montrant l'étape du procédé de fabrication où la silice est sous gravée par vapeur HF pour libérer la structure.

b) Vue en coupe de la structure à la fin de la gravure par vapeur HF et après retrait de la couche protectrice.

Le procédé de fabrication a été conçu de manière à libérer la partie mobile en fin de fabrication. La libération se fait en sous gravant la silice présente entre les électrodes à l'aide de vapeurs HF (cf. figure E.3).

Cette méthode de gravure présente l'avantage d'être une gravure sèche, elle nous évite donc les problèmes de stiction causée par les forces capillaires qui auraient pu apparaître si la gravure était humide. Cependant, l'inconvénient de la gravure par vapeur HF est qu'elle endommagera les miroirs qui sont composés de silice et de nitrure. Il est donc nécessaire de protéger les miroirs. Mais, pour nous éviter tout risque de stiction, la protection doit être simple à retirer, et de manière hautement sélective, avec une gravure de type sèche.

Nous avons donc décidé d'utiliser le polymère fluorocarboné déposé par un plasma de C_4F_8 dans le bâti de DRIE. Cette couche, que j'appellerai PTFE dans la suite, est habituellement utilisée comme couche de passivation dans le procédé Bosch de gravure anisotrope du silicium (cf. partie 2.3.2.3 p38). Elle présente plusieurs avantages : son dépôt est conforme (permet de recouvrir les gravures profondes), sa composition est proche du téflon (connu pour bien résister au HF), et de plus, le PTFE est simple à structurer par gravure sèche avec un plasma O_2 . Le PTFE était donc a priori le candidat idéal pour protéger nos miroirs pendant la gravure par vapeur HF de la silice. Ainsi, le procédé de fabrication a été imaginé de manière à encapsuler complètement les miroirs dans du PTFE (cf. figure E.3a). Après la libération de la partie mobile, il nous aurait ensuite suffi de faire un plasma O_2 pour retirer le PTFE (cf. figure E.3b).

Pour en arriver à une encapsulation complète des miroirs, le procédé de fabrication est nécessairement plus long que celui détaillé dans le corps de la thèse. En effet, il a besoin de

plusieurs structurations du PTFE, et il faudra fabriquer des supports spéciaux pour pouvoir rentrer le wafer dans la DRIE.

Pour les besoins de ce procédé, deux méthodes de structuration du PTFE ont été mises au point en tout début de thèse et ont pu être testées avec succès (cf. partie 6.1 p162) : l'une à l'aide d'un masque en résine et l'autre à l'aide d'un pochoir en silicium. Cependant, il s'est avéré que la couche en PTFE n'est pas suffisamment épaisse pour garantir une protection contre les vapeurs HF. En effet, une couche de silice protégée par du PTFE résiste quelques minutes à une immersion dans du BHF, mais ne résiste que quelques secondes aux vapeurs HF. Ce défaut de résistance est visible sur la figure E.4. Ces images acquises au microscope optique montrent la couche de PTFE après exposition aux vapeurs HF. La couche semble recouverte de craquelures mais un agrandissement permet de remarquer la présence de franges d'interférences, signe que la couche de silice a été entièrement sous gravée, laissant la couche de PTFE sans attaches, libre de se friper selon ses contraintes résiduelles. Puisque le PTFE n'a pas été gravé (il est toujours présent après gravure), nous en avons déduit que le PTFE est trop perméable pour être utilisé comme couche de protection.

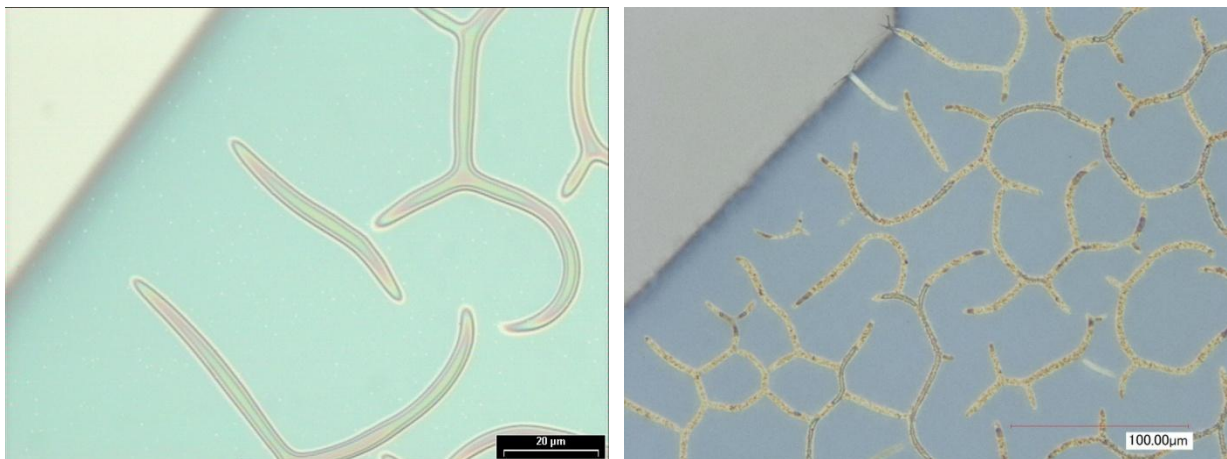


Figure E.4 : Images prises au microscope optique montrant l'aspect du PTFE après une exposition de douze secondes aux vapeurs HF, la silice a été entièrement gravée, même dans les zones recouvertes par le PTFE.

En fin de thèse, un procédé alternatif envisageable a été identifié : à la place du PTFE, il s'agirait d'utiliser des films secs photosensibles rendus résistants aux vapeurs HF par une métallisation. Toutefois, ce procédé alternatif présente a priori trois inconnues/inconvénients :

- premièrement, il faut utiliser des solvants liquides pour retirer les films secs, avec un risque de stiction ;
- deuxièmement, la viabilité d'un enrésinement d'un film sec sur des membranes de 30 µm d'épaisseur en silicium reste à prouver. En effet la pression des rouleaux chauffants (utilisés pour étaler la résine) risque de fracturer la membrane ;
- troisièmement, il reste à vérifier que les films secs métallisés résistent aux vapeurs HF.

E.4 Dimensionnement de la version SOI du miroir mobile

E.4.1 Choix de l'épaisseur de la silice et du silicium

Dans ce procédé de fabrication, la course des miroirs est fixée par l'épaisseur de silice du wafer SOI. Donc pour prendre en compte l'effet du Pull-in (cf. partie 3.2.2 p75), nous avons choisi une épaisseur de silice trois fois plus élevée que la course d'actionnement totale (375 nm pour la course + 125 nm de marge), soit 1.5 μm d'épaisseur. Cette valeur est proche de l'épaisseur maximale de silice thermique (2 μm) des wafers SOI usuels.

Le choix de l'épaisseur du silicium c'est fait en considérant deux points :

Premièrement, l'épaisseur du silicium doit être suffisamment élevée pour que les contraintes résiduelles (introduites par la silice enterrée) ne déforment pas la structure pendant sa fabrication.

Deuxièmement, il faut que l'épaisseur ne soit pas trop élevée pour éviter les problèmes de libération par vapeur HF et pour limiter la durée de la gravure XeF_2 .

Pour la structure conçue, une couche de 30 μm de silicium a été choisie pour éviter le flambage de la membrane durant certaines étapes de la fabrication. C'est aussi une épaisseur raisonnable de silicium qui ne nécessitera pas une gravure trop longue par XeF_2 .

E.4.2 Tranchées d'isolation, valeurs des capacités parasites

La grosse difficulté de ce procédé de fabrication a été de trouver le moyen de fixer 4 potentiels différents par structure, pour pouvoir ajuster le parallélisme de chaque miroir. Pour cela, nous gravons la face arrière du wafer SOI pour y définir des tranchées d'isolation électrique et ainsi former des électrodes sur lesquelles on peut appliquer des potentiels différents. Cependant, il a fallu d'une part garantir un blindage entre les différentes électrodes, et d'autre part faire attention aux capacités parasites. Nous avons dessiné les tranchées d'isolation de manière à ce que chaque électrode ait en face d'elle une surface en silicium reliée à la masse. Les capacités parasites introduites par ce blindage sont très faibles (moins d'un picofarad par électrode), car les tranchées de gravure DRIE seront larges (100 μm). La capacité parasite la plus gênante se situera entre les deux couches de silicium. Pour les réduire, nous avons envisagé de faire des ouvertures dans la fine couche de silicium pour limiter les surfaces en vis à vis.

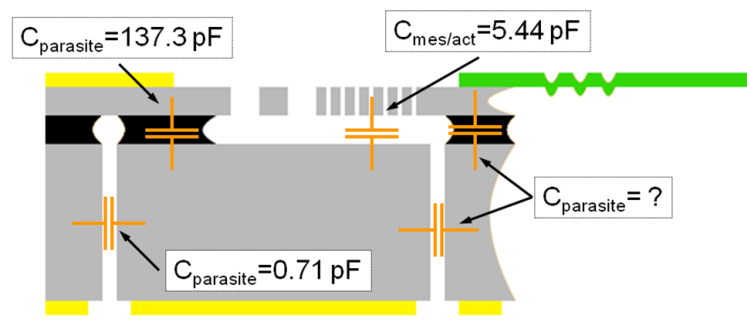


Figure E.5 : Vue en coupe d'une moitié de la structure mobile, montrant la répartition et la valeur des capacités parasites.

Sur le design actuel, seul le cadre est à un potentiel flottant. Pour simplifier le processus de fabrication, nous n'avons pas intégré d'étapes supplémentaires destinées à connecter le cadre rigide à la fine couche de silicium qui est à la masse. Cependant, une fois de plus, le gap de 100 μm entre l'électrode et le cadre rigide nous donne une capacité parasite très faible.

Des simulations nous ont permis de vérifier que les tranchées d'isolation ne fragiliseraient pas trop le wafer (cf. figure E.6). Pour répartir au maximum les contraintes créées par une déformation du wafer, nous avons remplacé, au niveau des pistes, la plupart des angles droits par des angles à 45° (cf. figure E.7). Certaines pistes ont aussi été élargies. Cependant, les principales contraintes se trouvent au niveau de la fine couche de silicium.

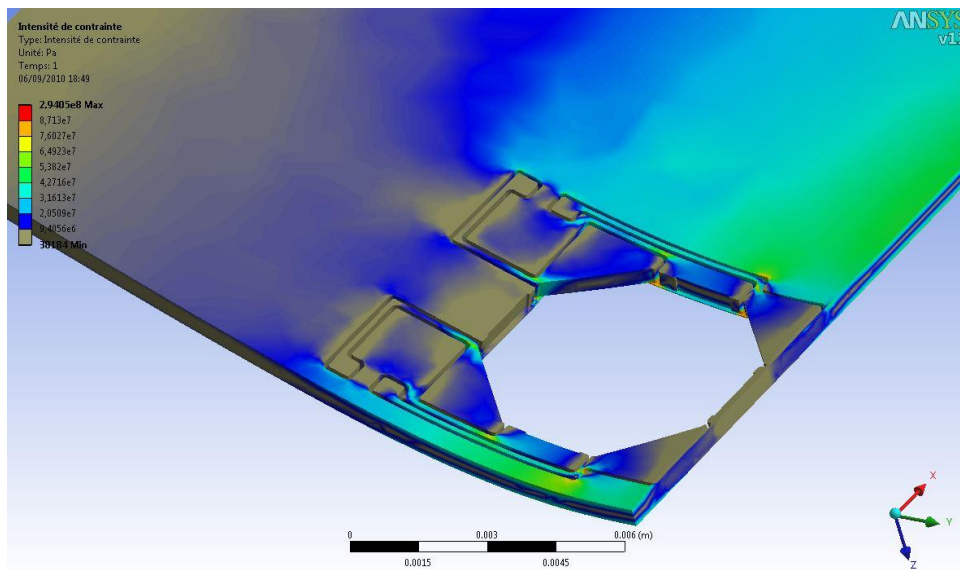


Figure E.6 : Simulation montrant les concentrations de contraintes sur la face arrière du wafer.

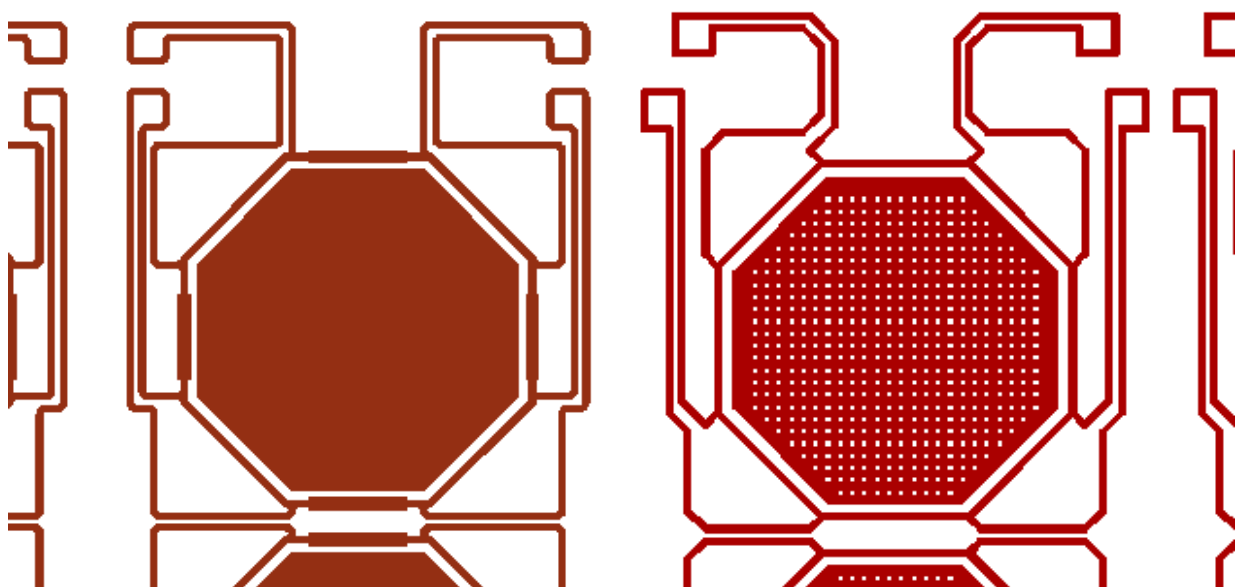


Figure E.7 : Modification du dessin des masques pour minimiser les risques de ruptures.

Au final, pour cette géométrie, il est nécessaire d'utiliser :

- des tranchées d'isolation de 100 μm de large gravées en face arrière ;
- un blindage entre chaque électrode ;
- un cadre rigide de 300 μm de large.

Tout cela a fortement limité l'espace restant pour les ouvertures. Ainsi la couverture actuelle des filtres Fabry Pérot est au maximum de 44 % (au lieu des 50 % désirés). Il devrait cependant être possible d'augmenter la surface couverte jusqu'à 49 %, en utilisant un octogone irrégulier.

E.5 Modélisation des déformations du cadre

A partir d'un premier dessin des masques nous avons pu estimer que si nous souhaitons conserver une structure symétrique, la surface des électrodes fera au maximum 1.82 mm² par électrode. Le gap variera entre 1.5 et 1 μm . Cela permet d'atteindre des forces assez élevées avec des tensions d'actionnement assez faibles. Par exemple, on peut obtenir une force de 1.4 mN par électrode avec seulement 15V et un gap d'air de 1 μm . Dans la suite du design nous nous sommes fixé une force de 1mN par électrode pour pouvoir faire nos optimisations.

Nous avons estimé à partir d'un premier cahier des charges de l'électronique de contrôle fourni par la SAGEM que nous aurons besoin d'avoir des ressorts ayant une raideur supérieure à égale à environ 5000 Nm⁻¹ par ressort. La raideur nécessaire étant élevée, pour limiter les risques de rupture des ressorts en forme de U ont été choisis. La largeur des ressorts a été fixée à 20 μm afin de limiter la durée de sous gravure pendant la libération par vapeur HF. Les ressorts auront donc une largeur de 40 μm et nous avons choisi d'espacer de 7 μm les trous de libération sur les électrodes.

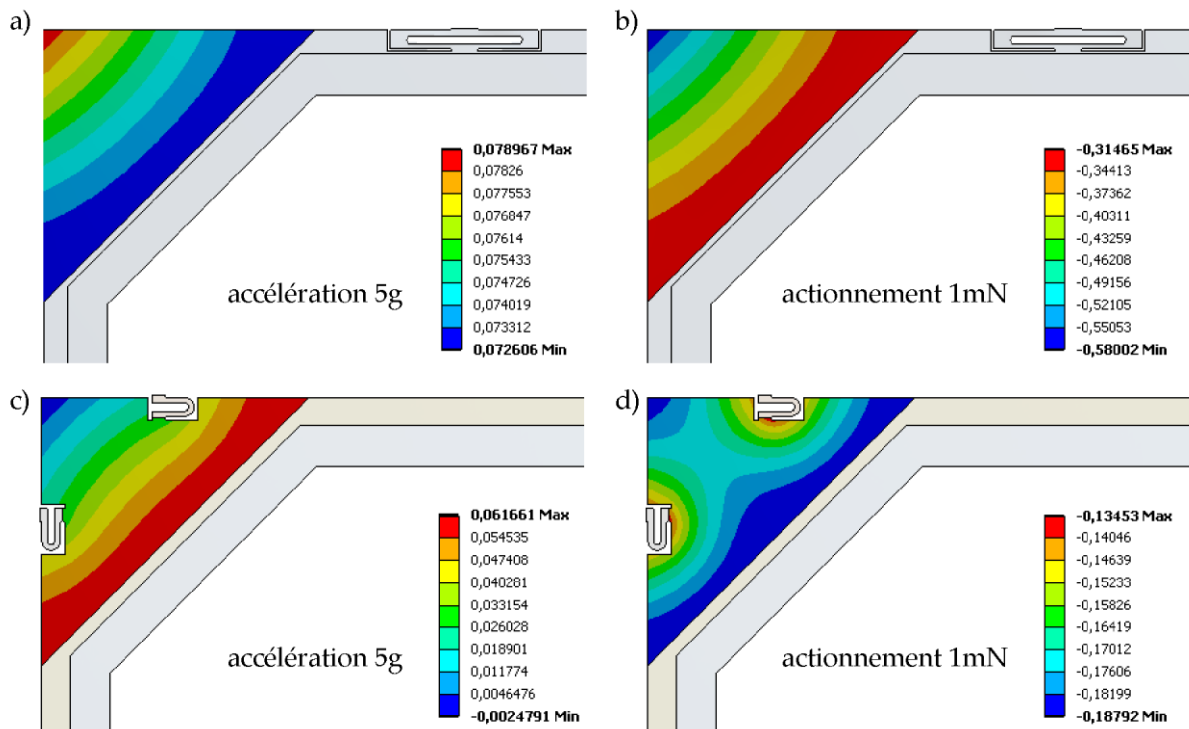


Figure E.8 : Simulations de la structure sur SOI réalisées sous ANSYS Workbench pour différents chargements (accélération de 5g, actionnement électrostatique de 1mN), et pour différents points d'ancrage des ressorts (sur électrode, sur cadre rigide).

Le choix de la longueur des ressorts a été réalisé sous ANSYS Workbench. Ces simulations nous ont permis de nous rendre compte d'un inconvénient de cette structure (cf. figure E.8) : les électrodes sont très flexibles et se déforment différemment en fonction du chargement (électrostatique ou accélération) et du point d'ancrage des ressorts (cadre ou électrode). Ainsi le dessin de la structure n'est pas terminé, car de nombreux problèmes sont encore à résoudre. L'optimisation de cette structure a été arrêtée lorsque l'on s'est rendu compte que le procédé de fabrication envisagé serait difficile à réaliser. Parmi les solutions envisageables, nous pourrions rajouter plusieurs ressorts pour essayer de rigidifier au maximum l'électrode d'actionnement. Nous pourrions aussi essayer d'utiliser un wafer SOI plus épais, mais cela risque de complexifier le procédé de fabrication. Une dernière solution serait de fabriquer une structure avec des renforts sous l'électrode, mais cela nous fera perdre une surface non négligeable de l'électrode d'actionnement.

Second inconvénient, les fréquences de résonance sont toujours dans le domaine de l'audible avec 4.5 kHz pour le premier mode.

Malgré ces inconvénients, avec la raideur actuelle, pour obtenir le déplacement désiré de 500 nm, il suffira d'appliquer une tension de 18 V. De plus, les déformations du cadre sont très faibles, de l'ordre de 1 à 2 nm pour un déplacement de 500 nm.

E.6 Conclusion

Un procédé de fabrication d'une matrice de miroirs mobiles à partir d'un substrat SOI a été proposé. Ce procédé s'est avéré non viable en raison de la perméabilité aux vapeurs HF des couches fluorocarbonées, prévues pour la protection des miroirs diélectriques multicouches lors de la gravure de la couche d'arrêt (en silice) de la gravure DRIE.

L'étude qui a été réalisée a montré que le procédé envisagé présente plusieurs inconvénients :

- une géométrie complexe qui doit être modifiée pour résoudre les problèmes de déformation des électrodes (qui fausse les mesures capacitives) et la différence de raideur selon le type de chargement ;
- la couche de silice enterrée restante qui risque de déformer la structure lors de changements de température ;
- l'épaisseur relativement faible de la couche de silice limitant la course d'ajustement du gap ;
- le procédé de fabrication long et complexe, nécessitant beaucoup d'étapes supplémentaires après la libération des miroirs, et reposant sur des protections temporaires difficiles à retirer ;
- risque de salir les miroirs pendant les étapes supplémentaires, empêchant d'atteindre les faibles gaps d'air exigés ;
- procédé de fabrication dépendant fortement de l'efficacité des couches de protection temporaires ;
- utilisation de vapeurs HF qui nécessite une protection des miroirs simple à retirer.
- connections des deux côtés de l'assemblage ;
- fréquences de résonance dans le domaine audible malgré la faible masse et la raideur plus élevée des ressorts ($\sim 5300 \text{ Nm}^{-1}$ par ressort).

Si nous le comparons au procédé sur wafer de silicium simple, ce procédé de fabrication sur wafer SOI présente donc des inconvénients majeurs : le nombre d'étapes technologiques après la libération des miroirs mobiles et la complexité de ces étapes.

Pour le processus de fabrication sur wafer SOI, il faut en effet compter 7 à 8 étapes supplémentaires par rapport à la version sur silicium simple. De plus, une part non négligeable de ces étapes se feront sur des structures fragiles. L'autre difficulté majeure est de garantir la propreté du wafer pour chacune de ces étapes. C'est une tâche très difficile voire impossible car pour obtenir un prototype utilisable, il faut assurer qu'aucune poussière de plus de 500 nm ne tombe sur l'un des miroirs. Ceci n'est pas réaliste avec une manipulation manuelle des wafers dans une salle blanche avec des zones de classe 100 ou 1000 comme celle de l'IEF. De plus, les zones critiques devant rester propres sont de très grandes surfaces (chacun des miroirs fait 5 mm de diamètre et une matrice occupe presque un quart de wafer), et les méthodes efficaces pour retirer les poussières comme le frottage (scrubbing) ou les films pelables sont difficilement utilisables à cause de la fragilité des structures.

Cette version n'est donc a priori pas adaptée à l'application envisagée mais pourra être utilisée dans d'autres applications où la propreté des miroirs est moins critique, car par rapport au procédé de fabrication sur silicium simple, ce procédé de fabrication sur SOI présente plusieurs avantages :

- structure plus légère et ressorts plus rigides donnant des fréquences de résonances plus élevées ;
- tension d'actionnement plus faible ;
- présence d'une couche d'arrêt pour la DRIE ;
- actionnement possible des deux côtés de la structure ;
- cadre qui se déforme très peu lors de l'actionnement, on peut donc diminuer ses dimensions ;
- ressorts de petite taille, ce qui laisse plus de place pour les miroirs.

Table des illustrations

Figure 1.1 : Les caméras multispectrales acquièrent un nombre restreint de bandes spectrales, alors que les caméras hyperspectrales acquièrent un spectre qui est souvent quasi continu, avec un nombre plus élevé de bandes spectrales. [Ingvaldsen 2012]	16
Figure 1.2 : Exemple d'utilisation de l'imagerie spectrale pour la détection d'objets camouflés. a) Image couleur de la scène observée. b) Mise en évidence de la cible [Minet 2011b]	17
Figure 1.3 : a) Photographie de la caméra hyperspectrale AVIRIS développée par la NASA dans les années 1970-80.	17
Figure 1.4 : Contraste entre la cible et le fond en fonction du nombre de bandes sélectionnées pour différents types de filtres.	20
Figure 1.5 : a) Schéma montrant le principe du montage optique permettant d'utiliser quatre filtres Fabry Pérot pour obtenir quatre images sur le même capteur.	21
Figure 2.1 : a) Figure de transmittance d'un filtre Fabry Pérot en fonction de la réflectance des miroirs.	24
Figure 2.2 : Schémas de deux montages optiques utilisés pour de l'imagerie spectrale avec des filtres Fabry Pérot [Kentischer 1998].	25
Figure 2.3 : Exemple de filtre Fabry Pérot de 7 mm de diamètre obtenu en assemblant deux miroirs et trois actionneurs piézos avec de la colle UV. [Saari 2009]	25
Figure 2.4 : Premier prototype de laboratoire d'un Fabry Pérot accordable fabriqué pour vérifier la faisabilité d'un filtre embarqué sur satellite [Berrilli 2011 ; Giovannelli 2012].	26
Figure 2.5 : Exemple de filtre Fabry Pérot réalisé par assemblage de miroirs (les cubes) sur une plateforme MEMS utilisée pour faire varier le gap d'air. [Yamanoi 2008]	27
Figure 2.6 : Exemple de filtre Fabry Pérot ayant des miroirs incurvés Si/Air (3.67/3.49 μm). [Malak 2011a ; Malak 2011b]	28
Figure 2.7 : Exemple de structure actionnée par voie électrostatique et possédant une grande amplitude de déplacement hors plan. Dans cet article [Sandner 2009], la structure ne peut pas maintenir le miroir à une position fixe, il est nécessaire de faire osciller la structure à sa fréquence de résonance pour obtenir des mouvements de grande amplitude. a) Vue d'ensemble montrant le miroir, les auteurs ont pu atteindre $\pm 240 \mu\text{m}$ de déplacement. b) Détail du ressort.	29
Figure 2.8 : Schéma montrant les différences entre le micro-usinage de volume (à gauche), et le micro-usinage de surface (à droite).	30
Figure 2.9 : Exemple de filtre Fabry Pérot réalisé par micro-usinage de surface. [Keating 2008]	31
Figure 2.10 : Exemple d'une matrice de filtres Fabry Pérot réalisé par micro-usinage de surface, conçue pour fonctionner à 77°K dans le domaine infrarouge moyen et lointain. [Stupar 2009]	32
Figure 2.11 : Exemple de filtre Fabry Pérot réalisé par sous-gravure d'une couche métallique en InGaAs. Le miroir multicouche est constitué d'un empilement air / InP. Le contraste	

d'indice élevé donne des miroirs possédant une réflectance élevée de 96-98 %, dans une gamme de 1.55 à 1.9 μm . [Bondavalli 2001 ; Seassal 1996]	32
Figure 2.12 : Micro-interféromètre réalisé par micro-usinage de surface avec une couche sacrificielle en polymère. [Blomberg 2010]	33
Figure 2.13 : Exemple de filtre Fabry Pérot faisant 6 mm de diamètre, réalisé par gravure isotrope humide d'un wafer en verre. [Gupta 2012]	35
Figure 2.14 : inclinaison des flancs de gravure KOH.	36
Figure 2.15 : Exemple de filtre Fabry Pérot de 2 mm de côté, réalisé par micro-usinage de volume, à l'aide de plusieurs gravures anisotropes humides utilisant du KOH. [Neumann 2008].....	36
Figure 2.16 : Second exemple de filtre Fabry Pérot de 2 mm de côté, réalisé par micro-usinage de volume, à l'aide d'une gravure KOH [Correia 1999]. Les deux miroirs sont des membranes en nitrure de silicium sur lesquelles a été déposée une fine couche de 40 nm d'argent. Ce filtre utilise une membrane en nitrure de silicium à la place des ressorts.	37
Figure 2.17 : Schéma du principe de gravure utilisé par le procédé Bosch.....	38
Figure 2.18 : Vue en coupe de gravures DRIE de tranchées de largeur différentes, réalisées pendant la thèse.....	38
Figure 2.19 : Exemple de filtre Fabry Pérot réalisé par micro-usinage de volume, à l'aide d'une gravure DRIE. [Palmer 2006]	39
Figure 2.20 : Procédé de fabrication utilisé dans [Palmer 2006] pour fabriquer la membrane par DRIE.	39
Figure 3.1 : Architecture proposée des Filtres Fabry Pérot en technologie MOEMS intégré 3D.	47
Figure 3.2 : Schéma de principe d'une cavité Fabry Pérot avec le trajet d'un rayon.	49
Figure 3.3 : Tracé de la formule (3.1) pour un gap d'air $d = 1500 \text{ nm}$ et des miroirs de réflectance R variant entre 30 et 70 %.	50
Figure 3.4 : Transmittance maximum T'_{max} (3.9) et minimum T'_{min} (3.10) en fonction de la réflectance du 2 ^{ème} miroir pour 2 valeurs de réflectance du 1 ^{er} miroir.....	53
Figure 3.5 : Schéma de la matrice de quatre lentilles positionnées devant le détecteur de 2352x1728 pixels. Le détecteur est découpé en quatre imagettes de 1024x768 pixels. Chaque Fabry Pérot doit être centré sur l'une des lentilles.....	55
Figure 3.6 : a) Simulation sous TFCalc de la réflectance et du déphasage à la réflexion de deux miroirs $\lambda/4$, composés de 9 couches.	57
Figure 3.7 : Valeurs des indices du nitrure de silicium et de la silice utilisées pour le dimensionnement du miroir mobile. En pointillés bleus, les valeurs d'indices utilisés pour le premier dimensionnement. En rouge, les valeurs d'indices mesurées sur des dépôts PECVD et utilisés pour les derniers dimensionnements. [Bååk 1982]	58
Figure 3.8 : Valeurs des indices utilisés pour le dimensionnement du miroir fixe déposé sur borosilicate. a) Indice du fluorure d'yttrium (YF_3). b) Indice du sulfure de zinc (ZnS).	59
Figure 3.9 : Modèles utilisés pour l'optimisation des miroirs avec le logiciel TFCALC.	60
Figure 3.10 : a) Modèle utilisé pour simuler le Fabry Pérot sous TFCALC.....	60

Figure 3.11 : Tracés de la réflectance (trait plein) et du déphasage à la réflexion (trait pointillé) pour le premier dimensionnement des miroirs.	61
Figure 3.12 : Valeur de la phase moyenne calculée à partir des valeurs simulées par TFCALC.	62
Figure 3.13 : Tracé en fonction de la longueur d'onde, des maxima de transmittance (en trait plein) et de la position de la largeur à mi-hauteur (en pointillé). Les courbes sont colorées selon l'ordre d'interférence m' . Les traits verticaux (en pointillés gris) indiquent la position des sauts du déphasage moyen.	62
Figure 3.14 : Largeur à mi-hauteur (FWHM), et intervalle spectral libre (ISL) du premier dimensionnement des miroirs. Lorsque cela a été possible, les valeurs ont été calculées à l'aide de la formule (3.8) donnant la figure de transmittance de la cavité. Des couleurs différentes sont utilisées pour représenter les différents ordres d'interférence m'	64
Figure 3.15 : Valeur de la finesse pour le premier dimensionnement des miroirs. Lorsque cela a été possible, les valeurs ont été calculées à partir des valeurs du FWHM et de l'ISL visibles sur la figure 3.14. Des couleurs différentes sont utilisées pour représenter les différents ordres d'interférence m'	65
Figure 3.16 : Tracés de la réflectance (trait plein) et du déphasage à la réflexion (trait pointillé) pour le dernier dimensionnement des miroirs.	66
Figure 3.17 : En rouge, valeur de la phase moyenne calculée à partir des valeurs simulées avec le logiciel TFCALC. En pointillés bleu, valeur idéale de la phase pour laquelle le comportement du filtre s'approche du comportement d'un Fabry pérot idéal.	67
Figure 3.18 : Comparaison de la formule simplifiée (3.1) avec la formule réelle (3.8) donnant la transmittance d'une cavité Fabry Pérot. La figure de transmittance a été calculée à l'aide des réflectances simulées par TFCALC pour un gap d'air de 900 nm pour le Fabry Pérot réel, et de 1225 nm pour le Fabry Pérot idéal.	67
Figure 3.19 : Tracé en fonction de la longueur d'onde, des maxima de transmittance (en trait plein) et de la position de la largeur à mi hauteur (en pointillé). Des couleurs différentes sont utilisées pour représenter les différents ordres d'interférence m'	68
Figure 3.20 : Largeur à mi-hauteur (FWHM), et intervalle spectral libre (ISL) pour le premier dimensionnement des miroirs. Lorsque cela a été possible, les valeurs ont été calculées à l'aide de la formule (3.8) donnant la figure de transmittance de la cavité.	69
Figure 3.21 : Valeur de la finesse pour le dernier dimensionnement des miroirs. Lorsque cela a été possible, les valeurs ont été calculées à partir des valeurs du FWHM et de l'ISL visibles sur la figure 3.20.	70
Figure 3.22 : Résultat du dimensionnement d'un multicouche ZnS/YF ₃ déposé sur borosilicate ayant une réflectance moyenne de 79 %.	71
Figure 3.23 : Schéma vue en coupe du Fabry Pérot avec les différentes épaisseurs/profondeurs, toutes déterminées à partir du gap physique entre les miroirs.	77
Figure 3.24 : Délimitation de la zone dans laquelle il faut dessiner la géométrie et marges prises pour le premier prototype. La surface totale du CMOS à recouvrir fait 17.405 x 12.787 mm.	78

Figure 3.25 : Schéma des deux formes de pupilles proposées, les parties colorées seront gravées.....	79
Figure 3.26 : Nomenclature utilisée par les fabricants de wafers pour définir l'orientation cristalline et le dopage d'un wafer à l'aide de la position et du nombre de méplats.....	81
Figure 3.27 : Comparaison des déformations (en μm) du cadre et des électrodes pour un déplacement de 4 μm avec : a) un wafer (100), b) un wafer (111).....	83
Figure 3.28 : Schéma représentant en rouge les différentes longueurs de ressorts simulées dans le tableau 3.12. : a) 5.5 mm ; b) 8.19 mm ; c) 10.13 mm. Les déformations des électrodes et du cadre ont été mesurées sur les surfaces vertes et jaunes.....	84
Figure 3.29 : a) Maillage automatique tétraédrique de 30 000 éléments utilisé pour trouver la longueur des ressorts pour laquelle les déformations seraient inférieures à 30 nm pour un déplacement de 4 μm	85
Figure 3.30 : Comparaison des déformations (en μm) du cadre et des électrodes pour un déplacement de 4 μm avec en a) le maillage tétraédrique, en b) le maillage fin.....	85
Figure 3.31 : a) Fréquence de résonance 1 : mode tambour.....	88
Figure 3.32 : En haut, vue en coupe pour un filtre. En bas, vue 3D éclatée de l'assemblage envisagé.	91
Figure 3.33 : Vue d'ensemble montrant les douze niveaux de masques de photolithographie dessinés en fin de thèse.....	97
Figure 4.1 : A gauche, évolution des vitesses de dépôt selon la série du dépôt. A droite, évolution des écarts à la moyenne des vitesses de dépôt selon la série du dépôt	107
Figure 4.2 : A gauche, évolution des indices de réfraction selon la série du dépôt. A droite, évolution des écarts à la moyenne des indices de réfraction selon la série du dépôt.....	108
Figure 4.3 : Contrainte résiduelle moyenne après dépôt pour les échantillons des séries 2 et 3.	109
Figure 4.4 : Evolution des contraintes résiduelles des films PECVD de silice et de nitrure en fonction de la température de recuit pour les deux séries d'échantillons.	115
Figure 4.5 : Résultat des mesures FTIR montrant l'évolution de l'aire sous les pics d'absorbance pour les couches de nitrure et de silice PECVD en fonction de la température de recuit. a) HFSIN série 1, b) LFSIN série 1, c) HFSIO série 2, d) LFSIO série 2.....	116
Figure 4.6 : Variation d'indice et d'épaisseur en fonction de a température de recuit. a) HFSIN, b) LFSIN, c) HFSIO, d) LFSIO.	118
Figure 4.7 : Rampes de recuit utilisées pour les différents miroirs, la valeur de contrainte résiduelle obtenue après recuit (en MPa) est indiquée à droite du N° d'échantillon. En trait plein, les miroirs pour lesquels le nitrure est déposé en premier. En pointillé, les miroirs pour lesquels de la silice est déposée en premier (cf. tableau 4.9).	119
Figure 4.9 : Image d'un miroir multicouche après recuit à 700 °C, sans rampe de montée en température. Les autres recuits, plus lents, ont formé des trous invisibles à l'œil nu.	122
Figure 4.10 : a) Images prise au microscope optique sur le bord du wafer, où se situent un grand nombre de trous causé par l'éclatement des cloques. A certains endroits, les cloques n'ont pas éclaté, elles sont cependant repérables à leur teinte non grise et grâce à la présence de franges d'interférences.....	123

Figure 4.11 : a) Photographie de la face arrière du wafer, non protégée pendant la gravure. Après la gravure des défauts (entourés en rouge) sont apparus sur le silicium. Un enrésinement de cette face avant gravure permettra d'y remédier.....	124
Figure 4.12 : Masque dessiné pour tester la libération des miroirs, en noir les parties qui seront gravées, en rouge la périphérie du wafer.	127
Figure 4.13 Procédé de fabrication des membranes.	128
Figure 4.14 : Images de membranes (8 couches) libérées et nettoyées. a) Une vue d'ensemble du wafer montrant toutes les membranes libérées. b) Un agrandissement de membranes recuites. c) Un agrandissement de membranes non recuites, flambées par les contraintes en compression.	129
Figure 4.15 : a) Variation de la réflectance du multicouche en fonction de la longueur d'onde. Trait plein : valeurs mesurées ; Trait pointillé : valeurs simulées.	131
Figure 4.16 : Photographie de l'interféromètre.....	132
Figure 4.17 : Méthode utilisée pour redresser les mesures.....	133
Figure 4.18 : Comparaison expérience/ simulation, avec pour a) et b) une membrane à +90 MPa, pour c) et d) une membrane à +40 MPa. Sur ces dernières, les étoiles indiquent les points de mesure utilisés pour remplir le tableau 4.14.	135
Figure 5.1 : Schéma montrant à gauche la définition de l'anisotropie, et à droite les principaux défauts inhérents à la DRIE.	140
Figure 5.2 : Vue en coupe montrant la profondeur gravée pour différentes tailles de motifs. Plusieurs défauts de gravure sont visibles : les fonds de gravure sont arrondis, les flancs ne sont pas complètement verticaux (voir sous gravure de 80 μm la grande ouverture à gauche) ; et enfin, il y a une diminution de la profondeur gravée avec la taille de l'ouverture (RIE Lag).....	141
Figure 5.3 : Schémas montrant différentes méthodes permettant de contrôler les vitesses de gravure DRIE.	142
Figure 5.4 : a) Vue d'ensemble du masque de test des motifs de remplissage (parties à graver en noir).	145
Figure 5.5 : Tracé de la vitesse de gravure en fonction de la largeur des tranchées.	147
Figure 5.6 : Vue en coupe d'échantillons de gravure. a) sans motifs de remplissage. b) Motifs de remplissage sous forme de grilles. c) Motifs de remplissage sous forme de piliers.....	147
Figure 5.7 : a) Profondeur relative gravée des motifs de remplissage en piliers, calculée par rapport aux tranchées de 100 μm de largeur.....	148
Figure 5.8 : a) Profondeur relative gravée des grilles, calculée par rapport aux tranchées de 100 μm de largeur.....	149
Figure 5.9 : Vue en coupe acquise avec un microscope optique montrant la présence de trous créés par la sous-gravure des parois du motif de remplissage en forme de grille.....	151
Figure 5.10 : a) Dimensions et forme du motif de remplissage utilisé sous les miroirs dans les masques finaux de la matrice de filtres.....	152
Figure 5.11 : a) Photographie montrant le fond de gravure de l'une des structures pour laquelle les motifs de remplissage ont été détachés.	153

Figure 5.12 : a) Deux défauts dans les dessins des motifs de remplissage : certaines mailles des grilles ont été ouvertes pour pouvoir paver toute les surfaces ; les tranchées délimitant les motifs de remplissage sont trop larges : 100 μm au lieu de 75 μm	153
Figure 5.13 : a) Ouverture hexagonale tapissée par des lignes de 76-77 μm séparées de 30 μm	154
Figure 5.14 : a) Diagramme de Voronoi montrant la répartition aléatoire des points sur un disque avant la première optimisation. Les polygones non colorés sont dans les limites de surface imposée en début d'exécution.....	155
Figure 5.15 : a) Histogramme montrant la répartition des surfaces mesurées sur les cellules de Voronoi de la figure 5.14b. Le trait rouge représente la surface moyenne cible, les deux traits verts sont les limites à $\pm 15\%$ autour de la surface ciblée.....	156
Figure 5.16 : Dimensions retenues pour trouver le nombre de motifs de remplissage à utiliser pour paver un disque de rayon $R = 2597 \mu\text{m}$ avec des motifs ayant une surface maximale de $26805 \mu\text{m}^2$	157
Figure 6.1 : Dessin des deux versions des masques, permettant d'identifier les parties représentées schématiquement sur la figure 6.2.	162
Figure 6.2 : Etapes de la libération des membranes protégées par la couche de passivation. Les motifs de remplissage ne sont pas représentés sur ce schéma.....	163
Figure 6.3 : Deux images acquises au microscope optique montrant la gravure par le XeF_2 des zones non protégées par le PTFE.	164
Figure 6.4 : a) Image d'un échantillon gravé à l'aide d'un pochoir en silicium posé sur la couche de PTFE.....	165
Figure 6.5 : Photographie montrant le pochoir et un wafer gravé	166
Figure 6.6 : Procédé d'alignement.	167
Figure 6.7 : a) La résine est protégée des deux côtés par un film en polyéthylène (pelé avant application) et par un film en polyester conservé pendant l'enrésinement : ce dernier film, transparent aux UV, peut aussi être conservé pendant l'insolation.....	169
Figure 6.9 : a) Principe de fonctionnement des rouleaux chauffants du laminateur Heatseal H535 Turbo utilisant des sabots chauffants et des accumulateurs de chaleur pour chauffer l'extérieur des rouleaux.	172
Figure 6.10 : a) Modifications réalisées sur la plastifieuse Excelam pour permettre de monter les rouleaux de film secs et créer une hotte aspirante permettant d'utiliser l'appareil hors des hottes d'enrésinement.	173
Figure 6.11 : Configuration des rouleaux pour l'enrésinement automatique à l'aide de la plastifieuse Excelam.	173
Figure 6.12 : a) Après lamination, des bulles d'air peuvent être emprisonnées si le wafer comporte des structures de seulement 1 μm de haut.....	175
Figure 6.13 : a) image au microscope optique montrant les bulles d'air emprisonnées dans des gravures de 5 μm de profondeur.	176
Figure 6.14 : Deux images prises au microscope électronique à balayage montrant à gauche une vue d'ensemble de la résine développée, à droite le flanc de la résine.	177

Figure 6.15 : a) Résultat de la métallisation sur silicium par lift-off de 200 nm d'or avec pour sous couche d'adhérence 20 nm de chrome. La fine couche de résine au fond des motifs développés créé des défauts sur les bords des métallisations.	177
Figure 6.16 : a) Enrésinement de 15 μm de film sec sur des structures entièrement débouchantes de grandes dimensions.....	178

Liste des publications

Bertin H., Bosseboeuf A., Coste P., Minet J., Taboury J., Péalat M., Roux N., **Design of a micromachined tunable Fabry-Perot filter array for multispectral snapshot imaging**, OPTRO 2012, Paris, France, February 8-10, (2012)

Bertin H., Bosseboeuf A., Moulin J., Péalat M., Roux N., **Large area and broadband semi-reflective Bragg mirror membrane manufactured by PECVD**, MME 2012, Ilmenau, Germany, September 9-12, (2012)

Bertin H., Bosseboeuf A., Coste P., Péalat M., Roux N., **Large area broadband semi-reflective Bragg mirror membrane manufactured by PECVD**, J. Micromech. Microeng. (2013), 23(7), p 074005. <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/23/7/074005>

Bosseboeuf A., Fabbri F., Parrain F., Coste P., Bertin H., Xu W., **Les microsystèmes électromécaniques optiques**, Photoniques N°60, p.29-32 Juillet-Août (2012)

Legendre O., Bertin H., Garel O., Mathias H., Megherbi S., Jafari K., Juilliard J., Colinet E., **A Low-Cost, Built-In Self-Test Method for Resistive MEMS sensors**, EUROSENSORS XXV (Eurosensors'11), Athens, Greece, September 4-7, (2011), 194, p 8-15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2013.01.013>

Legendre O., Bertin H., Garel O., Zhang M., Mathias H., Megherbi S., Juilliard J., Maily F., **High-Resolution Micro-Pirani Pressure Sensor With Transient Response Processing and Time-Constant Evaluation**, IEEE Sensors, vol.12, no.10, p 3090-3097, October, (2012), 12(10), p3090-3097. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2012.2207102>

Minet J., Taboury J., Goudail F., Péalat M., Roux N., Ferrec Y., Bertin H., Bosseboeuf A., **Adaptive snapshot multispectral imaging for target detection applications**, OPTRO 2012, Paris, France, February 8-10, (2012)

Références

- [Alain 2012] Alain P. **Etude des propriétés électro-thermo-mécaniques de nanofils en silicium pour leur intégration dans les microsystèmes**. Lieu de soutenance: Université Paris Sud, (2012), p 190
- [Ay 2004] Ay F. and Aydinli A. **Comparative investigation of hydrogen bonding in silicon based PECVD grown dielectrics for optical waveguides**. Opt Mater, 22 January (2004), 26(1), p 33-46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optmat.2003.12.004>
- [Bååk 1982] Bååk T. **Silicon oxynitride; a material for GRIN optics**. Appl Opt, Mars 15 (1982), 21(6), p 1069-1072. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.21.001069>
- [Bargiel 2010] Bargiel S., Rabenorosoa K., Clévy C., Gorecki C. and Lutz P. **Towards micro-assembly of hybrid MOEMS components on a reconfigurable silicon free-space micro-optical bench**. J Micromech Microeng, (2010), 20(4), p 045012. <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/20/4/045012>
- [Bartek 1999] Bartek M., Correia J.H. and Wolffenbuttel R.F. **Silver-based reflective coatings for micromachined optical filters**. J Micromech Microeng, (1999), 9(2), p 162. <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/9/2/314>
- [Berrilli 2011] Berrilli F., Coccio M., Giovannelli L., Del Moro D., Giannattasio F., Piazzesi R., Stangalini M., Egidi A., Cavallini F., Greco V. and Selci S. **The Fabry-Perot interferometer prototype for the ADAHELI solar small mission**. Proc. SPIE, San Diego, California, USA, (2011), p 814807-814807. <http://dx.doi.org/10.1117/12.893552>
- [Blomberg 2010] Blomberg M., Kattelus H. and Miranto A. **Electrically tunable surface micromachined Fabry-Perot interferometer for visible light**. Sens Actuators A Phys, August (2010), 162(2), p 184-188. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2010.01.037>
- [Bondavalli 2001] Bondavalli P., Benyattou T., Garrigues M., Leclercq J.L., Jourba S., Pautet C. and Hugon X. **Opto-mechanical design of tuneable InP-based Fabry-Pérot filter for gas analysis**. Sens Actuators A Phys, July 16 (2001), 94(3), p 136-141. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247\(01\)00701-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247(01)00701-4)
- [Born 1999] Born M. and Wolf E. **Principles of optics, electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light (7th expanded Ed.)**. Cambridge University press, (1999). ISBN 0521642221.
- [Bourouina 2004] Bourouina T., Masuzawa T. and Fujita H. **The MEMSNAS process: microloading effect for micromachining 3-D structures of nearly all shapes**. J Microelectromech Syst, (2004), 13(2), p 190-199. <http://dx.doi.org/10.1109/JMEMS.2003.823219>

- [Brantley 1973] Brantley W.A. **Calculated elastic constants for stress problems associated with semiconductor devices.** *J Appl Phys*, 01/00/ (1973), 44(1), p 534-535. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1661935>
- [Ceiler 1995] Ceiler M.F., Kohl P.A. and Bidstrup S.A. **Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition of Silicon Dioxide Deposited at Low Temperatures.** *J Electrochem Soc*, June 1 (1995), 142(6), p 2067-2071. <http://dx.doi.org/10.1149/1.2044242>
- [Correia 1999] Correia J.H., Bartek M. and Wolffenbuttel R.F. **Bulk-micromachined tunable Fabry-Perot microinterferometer for the visible spectral range.** *Sens Actuators A Phys*, August 30 (1999), 76(1-3), p 191-196. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247\(99\)00023-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00023-0)
- [Danaie 2002] Danaie K., Bosseboeuf A., Clerc C., Gousset C. and Julie G. **Fabrication of UV-transparent SixOyNz membranes with a low frequency PECVD reactor.** *Sens Actuators A Phys*, April 30 (2002), 99(1-2), p 78-81. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247\(01\)00899-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247(01)00899-8)
- [Douglass 2003] Douglass M. **DMD reliability: a MEMS success story.** *Proc. SPIE*, San Jose, California, USA, January 25 (2003),p 1-11. <http://dx.doi.org/10.1117/12.478212>
- [Du 1999] Du Q., Faber V. and Gunzburger M. **Centroidal Voronoi Tessellations: Applications and Algorithms.** *SIAM Rev*, (1999), 41(4), p 637-676. <http://dx.doi.org/10.1137/S0036144599352836>
- [Dudley 2003] Dudley D., Duncan W.M. and Slaughter J. **Emerging digital micromirror device (DMD) applications.** *Proc. SPIE*, San Jose, California, USA, January 25 (2003),p 14-25. <http://dx.doi.org/10.1117/12.480761>
- [Fernandez 2003] Fernandez E. and Artal P. **Membrane deformable mirror for adaptive optics: performance limits in visual optics.** *Opt Express*, May 5 (2003), 11(9), p 1056-1069. <http://dx.doi.org/10.1364/OE.11.001056>
- [Fourmond 2008] Fourmond E., Dupuis J., Marcq F., Dubois C. and Lemiti M. **Impact of ammonia pretreatment of the silicon surface prior to the deposition of silicon nitride layer by pecvd.** *Proc. 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, (2008),p 1629-1632.
- [Garel 2009] Garel O. **Etude du procédé d'élaboration et caractérisation de micro dispositifs en silicium poreux pour la mesure du taux d'humidité.** Lieu de soutenance: Université Paris Sud, (2009), p 200
- [Gat 2000] Gat N. **Imaging spectroscopy using tunable filters: a review.** *Proc. SPIE*, Orlando, Florida, USA, April 5 (2000),p 50-64. <http://dx.doi.org/10.1117/12.381686>
- [Giovannelli 2012] Giovannelli L., Berrilli F., Cocciolo M., Del Moro D., Egidi A., Piazzesi R. and Stangalini M. **Testing of the "Tor Vergata" Fabry-Pérot interferometer**

- prototype.** *Proc. SPIE*, Amsterdam, Netherlands, September 24 (2012),p 84463Q-84463Q. <http://dx.doi.org/10.1117/12.926349>
- [Graebner 2002] Graebner J.E., Pau S. and Gammel P.L. **All-optical excitation and detection of microelectrical-mechanical systems.** *Appl Phys Lett*, September 11 (2002), 81(19), p 3531-3533. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1519351>
- [Gupta 2012] Gupta N., Tan S. and Zander D.R. **Microelectromechanical systems–based visible-near infrared Fabry-Perot tunable filters using quartz substrate.** *Opt Eng*, July 19 (2012), 51(7), p 074007-074001. <http://dx.doi.org/10.1117/1.OE.51.7.074007>
- [Hall 2008] Hall N.A., Okandan M., Littrell R., Serkland D.K., Keeler G.A., Peterson K., Bicen B., Garcia C.T. and Degertekin F.L. **Micromachined Accelerometers With Optical Interferometric Read-Out and Integrated Electrostatic Actuation.** *J Microelectromech Sys*, (2008), 17(1), p 37-44. <http://dx.doi.org/10.1109/JMEMS.2007.910243>
- [Han 2000] Han J., Kim J., Kim T.-S. and Kim J.-S. **Performance of Fabry–Perot microcavity structures with corrugated diaphragms.** *Sens Actuators A Phys*, February 1 (2000), 79(2), p 162-172. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247\(99\)00267-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00267-8)
- [Hauser 2003] Hauser A., Spiegel M., Fath P. and Bucher E. **Influence of an ammonia activation prior to the PECVD SiN deposition on the solar cell performance.** *Proc. Solar Energy Materials and Solar Cells*, Valencia, Spain, (2003),p 357-362. [http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0248\(02\)00180-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0248(02)00180-0)
- [Herzinger 1998] Herzinger C.M., Johs B., McGahan W.A., Woollam J.A. and Paulson W. **Ellipsometric determination of optical constants for silicon and thermally grown silicon dioxide via a multi-sample, multi-wavelength, multi-angle investigation.** *Journal of Applied Physics*, March 15 (1998), 83(6), p 3323-3336. <http://dx.doi.org/10.1063/1.367101>
- [Hopcroft 2010] Hopcroft M.A., Nix W.D. and Kenny T.W. **What is the Young's Modulus of Silicon?** *J Microelectromech Sys*, (2010), 19(2), p 229-238. <http://dx.doi.org/10.1109/JMEMS.2009.2039697>
- [Hsu 2008] Hsu S.-T., Klose T., Drabe C. and Schenk H. **Two dimensional microscanners with large horizontal-vertical scanning frequency ratio for high-resolution laser projectors.** *Proc. SPIE*, San Jose, CA, February 8 (2008),p 688703-688703. <http://dx.doi.org/10.1117/12.761617>
- [Huang 2006] Huang S., Li B. and Zhang X. **Elimination of stress-induced curvature in microcantilever infrared focal plane arrays.** *Sens Actuators A Phys*, August 14 (2006), 130–131(0), p 331-339. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2005.09.012>
- [Ingvaldsen 2012] Ingvaldsen A. **An imaging spectrometer using acousto-optic tunable filter.** Lieu de soutenance: Norwegian University of Science and Technology, (2012), p 76

- [Jansen 1995] Jansen H., de Boer M., Legtenberg R. and Elwenspoek M. **The black silicon method: a universal method for determining the parameter setting of a fluorine-based reactive ion etcher in deep silicon trench etching with profile control.** J Micromech Microeng, (1995), 5(2), p 115. <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/5/2/015>
- [Jansen 1996] Jansen H., Gardeniers H., de Boer M., Elwenspoek M. and Fluitman J. **A survey on the reactive ion etching of silicon in microtechnology.** J Micromech Microeng, (1996), 6(1), p 14. <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/6/1/002>
- [Janssen 2009] Janssen G.C.A.M., Abdalla M.M., van Keulen F., Pujada B.R. and van Venrooy B. **Celebrating the 100th anniversary of the Stoney equation for film stress: Developments from polycrystalline steel strips to single crystal silicon wafers.** Thin Solid Films, July (2009), 517(6), p 1858-1867. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2008.07.014>
- [Jensen 2004] Jensen S. and Hansen O. **Characterization of the microloading effect in deep reactive ion etching of silicon.** Proc. SPIE, San Jose, CA, January 24 (2004), p 111-118. <http://dx.doi.org/10.1117/12.524461>
- [Jensen 2005] Jensen S., Jensen J.M., Quaade U.J. and Hansen O. **Uniformity-improving dummy structures for deep reactive ion etching (DRIE) processes.** Proc. SPIE, San Jose, CA, April 11 (2005), p 39-46. <http://dx.doi.org/10.1117/12.588552>
- [Jerman 1991] Jerman J.H., Clift D.J. and Mallinson S.R. **A miniature Fabry-Perot interferometer with a corrugated silicon diaphragm support.** Sens Actuators A Phys, November (1991), 29(2), p 151-158. [http://dx.doi.org/10.1016/0924-4247\(91\)87117-L](http://dx.doi.org/10.1016/0924-4247(91)87117-L)
- [Kaajakari 2009] Kaajakari V. **Practical MEMS.** Las Vegas/US: Small Gear Publishing, (2009). ISBN 13: 9780982299104.
- [Karttunen 2000] Karttunen J., Kiihamaki J. and Franssila S. **Loading effects in deep silicon etching.** Proc. SPIE, Santa Clara, CA, August 25 (2000), p 90-97. <http://dx.doi.org/10.1117/12.396475>
- [Keating 2008] Keating A.J., Antoszewski J., Silva K.K.M.B.D., Winchester K.J., Nguyen T., Dell J.M., Musca C.A., Faraone L., Mitra P., Beck J.D., Skokan M.R. and Robinson J.E. **Design and Characterization of Fabry-Pérot MEMS-Based Short-Wave Infrared Microspectrometers.** J Electron Mater december 01 (2008), 37(12), p 1811-1820. <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-008-0526-0>
- [Kentischer 1998] Kentischer T.J., Schmidt W., Sigwarth M. and Uexküll M.v. **TESOS, a double Fabry-Perot instrument for solar spectroscopy.** Astron Astrophys. 1998, vol. 340, no. 2 (1998) Cited], pp. 569-578. Lien:<<http://aa.springer.de/papers/8340002/2300569.pdf>>. ISSN 1432-0746. (consulté le 18/05/2013)

- [Kiihamaki 1999] Kiihamaki J. and Franssila S. **Pattern shape effects and artefacts in deep silicon etching**. *Proc. J Vac Sci Technol A* Baltimore, Maryland (USA), (1999) AVS,p 2280-2285. <http://dx.doi.org/10.1116/1.581761>
- [Kim 1986] Kim J.-T. and Kim M.-C. **Silicon wafer technique for infrared spectra of silica and solid samples (I)**. *Korean J of Chem Eng*, March (1986), 3(1), p 45-51. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02697522>
- [Kim 2001] Kim J., Cho D.-i.D. and Muller R.S. **Why is (111) silicon a better mechanical material for MEMS**. *Proc. Transducers 01-Euroensors XV*, Munich, Germany, June 10-14 (2001),p 662-665.
- [Kressman 2002] Kressmann R., Klaiber M. and Hess G. **Silicon condenser microphones with corrugated silicon oxide/nitride electret membranes**. *Sens Actuators A Phys*, september 01 (2002), 100(2-3), p 301-309. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247\(02\)00137-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247(02)00137-1)
- [Kuhn 2000] Kuhn J.L., Barclay R.B., Greenhouse M.A., Mott D.B. and Satyapal S. **Electromechanical simulation of a large-aperture MOEMS Fabry-Perot tunable filter**. *Proc. SPIE*, Santa Clara, CA, September 18 (2000),p 325-335. <http://dx.doi.org/10.1117/12.396504>
- [Kundu 2012] Kundu S.K., Hikita A., Kumagai S. and Sasaki M. **Investigation of Optical Flatness of Stretched Membrane Drum-Type Micromirror**. *J Lightwave Technol*, May 15 (2012), 30(10), p 1377-1385. <http://dx.doi.org/10.1109/JLT.2012.2186432>
- [Laszczyk 2009] Laszczyk K., Bargiel S., Krężel J., Gorecki C. and Kujawińska M. **Silicon comb-drive X-Y microstage with frame-in-the-frame architecture for MOEMS applications**. *Proc. SPIE*, Dresden, Germany, May 18 (2009),p 736210-736210. <http://dx.doi.org/10.1117/12.821460>
- [Lin 1994] Lin L.Y., Lee S.S., Pister K.S.J. and Wu M.C. **Micro-machined three-dimensional micro-optics for integrated free-space optical system**. *IEEE Photon Technol Lett*, (1994), 6(12), p 1445-1447. <http://dx.doi.org/10.1109/68.392216>
- [Malak 2011a] Malak M. **Contribution aux MEMS Photoniques : Etude de Résonateurs et Interféromètres Optiques Basés sur des Réflecteurs de Bragg Tout Silicium** Lieu de soutenance: Université Paris Est, (2011a), p 208
- [Malak 2011b] Malak M., Pavy N., Marty F., Peter Y.A., Liu A.Q. and Bourouina T. **Micromachined Fabry-Perot resonator combining submillimeter cavity length and high quality factor**. *Applied Physics Letters*, May 26 (2011b), 98(21), p 211113-211113. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3595277>
- [Mani 2007] Mani S. and Saif T. **Stress development in plasma-deposited silicon dioxide thin-films due to hydrogen evolution**. *Thin Solid Films*, January 22 (2007), 515(5), p 3120-3125. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2006.08.025>

- [Martino 2012] Martino J., Prele D., Piat M., Voisin F., Breelle E., Belier B., Bordier G., Marnieros S., Pajot F. and Atik Y. **Characterization of NbSi TES Bolometers: Preliminary Results.** *J Low Temp Phys*, May (2012), 167(3-4), p 176-181. <http://dx.doi.org/10.1007/s10909-012-0515-9>
- [Marty 2005] Marty F., Rousseau L., Saadany B., Mercier B., Français O., Mita Y. and Bourouina T. **Advanced etching of silicon based on deep reactive ion etching for silicon high aspect ratio microstructures and three-dimensional micro- and nanostructures.** *Microelectron J*, July (2005), 36(7), p 673-677. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mejo.2005.04.039>
- [Mielke 1997] Mielke S.L., Ryan R.E., Hilgeman T., Lesyna L., Madonna R.G. and Van Nostrand W.C. **Measurements of the phase shift on reflection for low-order infrared Fabry-Perot interferometer dielectric stack mirrors.** *Appl Opt*, November 1 (1997), 36(31), p 8139-8144. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.36.008139>
- [Minet 2011a] Minet J. **Imagerie multispectrale, vers une conception adaptée à la détection de cibles.** Lieu de soutenance: Université Paris Sud, (2011a), p 119
- [Minet 2011b] Minet J., Taboury J., Goudail F., Péalat M., Roux N., Lonnoy J. and Ferrec Y. **Influence of band selection and target estimation error on the performance of the matched filter in hyperspectral imaging.** *Appl Opt*, August 01 (2011b), 50(22), p 4276-4285. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.50.004276>.
- [Motamedi 1997] Motamedi M.E., Wu M.C. and J. P.K.S. **Micro-opto-electro-mechanical devices and on-chip optical processing.** *Opt Eng*, May 01 (1997), 36(5), p 1282-1297. <http://dx.doi.org/10.1117/1.601356>
- [Mott 2003] Mott D.B., Barclay R.B., Bier A., Chen T.C., DiCamillo B., Deming D., Greenhouse M.A., Henry R., Hewagama T., Jacobson M., Quijada M., Satyapal S. and Schwinger D.S. **Micromachined tunable Fabry-Perot filters for infrared astronomy.** *Proc. SPIE*, Waikoloa, HI, March 7 (2003), p 578-585. <http://dx.doi.org/10.1117/12.461595>
- [Nee 2000] Nee J.T., Conant R.A., Hart M.R., Muller R.S. and Lau K.Y. **Stretched-film micromirrors for improved optical flatness.** *Proc. Microelectromech Sys, MEMS 2000 The Thirteenth Annual International Conference on*, Miyazaki, 23-27 Jan (2000), p 704-709. <http://dx.doi.org/10.1109/MEMSYS.2000.838604>
- [Neumann 2008] Neumann N., Ebermann M., Kurth S. and Hiller K. **Tunable infrared detector with integrated micromachined Fabry-Perot filter.** *J Micro/Nanolith MEMS MOEMS*, (2008), 7(2), p 021004-021004. <http://dx.doi.org/10.1117/1.2909206>
- [Nieva 2009] Nieva P., Kuo J., Chiang S.-H. and Syed A. **A novel MOEMS pressure sensor: Modelling and experimental evaluation.** *Sadhana*, 2009/08/01 (2009), 34(4), p 615-623. <http://dx.doi.org/10.1007/s12046-009-0039-4>

- [Ong 2006] Ong P.L., Wei J., Tay F.E.H. and Iliescu C. **A new fabrication method for low stress PECVD - SiNx layers.** J Phys: Conf Ser, (2006), 34(1), p 764.
<http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/34/1/126>
- [Orfanidis 2010] Orfanidis S.J. **Electromagnetic Waves and Antennas.** Rutgers University, (2010).
- [Palmer 2006] Palmer J.A., Hsieh W.-T., Quijada M., Mott B., Akpan E., Brown J.G.L., Jacobson M.B. and Greenhouse M.A. **Design, characterization, and control of a large aperture MOEMS Fabry-Perot tunable infrared filter.** Proc. SPIE, San Jose, CA, (2006),p 61140G-61140G. <http://dx.doi.org/10.1117/12.641266>
- [Picciotto 2009] Picciotto A., Bagolini A., Bellutti P. and Boscardin M. **Influence of interfaces density and thermal processes on mechanical stress of PECVD silicon nitride.** Appl Surf Sci, October 15 (2009), 256(1), p 251-255.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.08.010>
- [Quinn 2012] Quinn J., Sun F., Langbein F.C., Lai Y.-K., Wang W. and Martin R.R. **Improved initialisation for centroidal Voronoi tessellation and optimal Delaunay triangulation.** Computer-Aided Design, November (2012), 44(11), p 1062-1071.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2012.05.002>
- [Rissanen 2012] Rissanen A., Akujärvi A., Antila J., Blomberg M. and Saari H. **MOEMS miniature spectrometers using tuneable Fabry-Perot interferometers.** J Micro/Nanolith MEMS MOEMS, 25 Mai (2012), 11(2), p 023003-023001.
<http://dx.doi.org/10.1117/1.JMM.11.2.023003>
- [Saadany 2006] Saadany B., Malak M., Kubota M., Marty F., Mita Y., Khalil D. and Bourouina T. **Free-Space Tunable and Drop Optical Filters Using Vertical Bragg Mirrors on Silicon.** Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of, (2006), 12(6), p 1480-1488. <http://dx.doi.org/10.1109/JSTOE.2006.884082>
- [Saari 2009] Saari H., Aallos V.-V., Akujärvi A., Antila T., Holmlund C., Kantojärvi U., Mäkynen J. and Ollila J. **Novel miniaturized hyperspectral sensor for UAV and space applications.** Proc. SPIE, Berlin, Germany, August 31 (2009),p 74741M-74741M. <http://dx.doi.org/10.1117/12.830284>
- [Sanders 2009] Sanders R., van Lierop D., de Jong B. and Soemers H. **Design and fabrication of a MEMS mirror for miniature laser projection.** Proc. SPIE, February 23 (2009),p 72080R-72080R. <http://dx.doi.org/10.1117/12.807639>
- [Sandner 2009] Sandner T., Drabe C., Schenk H. and Kenda A. **Large stroke MOEMS actuators for optical path length modulation in miniaturized FTIR spectrometers.** Proc. SPIE, Orlando, Florida, USA, April 13 (2009),p 73190H-73190H.
<http://dx.doi.org/10.1117/12.818605>
- [Schelcher 2012] Schelcher G. **Le transfert de films : vers une intégration hétérogène des micro et nanosystèmes.** Lieu de soutenance: Université Paris Sud, (2012), p 191

- [Seassal 1996] Seassal C., Leclercq J.L. and Viktorovitch P. **Fabrication of InP-based freestanding microstructures by selective surface micromachining.** J Micromech Microeng, June (1996), 6(2), p 261. <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/6/2/008>
- [Stein 1979] Stein H.J., Wells V.A. and Hampy R.E. **Properties of Plasma-Deposited Silicon Nitride.** J Electrochem Soc, October 1 (1979), 126(10), p 1750-1754. <http://dx.doi.org/10.1149/1.2128790>
- [Stephan 2007] Stephan K., Pittet P., Renaud L., Kleimann P., Morin P., Ouaini N. and Ferrigno R. **Fast prototyping using a dry film photoresist: microfabrication of soft-lithography masters for microfluidic structures.** J Micromech Microeng, (2007), 17(10), p N69. <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/17/10/N01>
- [Stupar 2009] Stupar P.A., Borwick R.L., DeNatale J.F., Kobrin P.H. and Gunning W.J. **MEMS tunable Fabry-Perot Filters with thick, two sided optical coatings.** Proc. Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2009 TRANSDUCERS 2009 International, 21-25 June 2009 (2009),p 1357-1360. <http://dx.doi.org/10.1109/SENSOR.2009.5285853>
- [Tarraf 2004] Tarraf A., Daleiden J., Irmer S., D. P. and H. H. **Stress investigation of PECVD dielectric layers for advanced optical MEMS.** J Micromech Microeng, (2004), 14(3), p 317. <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/14/3/001>
- [Thevenet 2005] Thevenet J. **Conception et réalisation d'un microsystème Fabry-Pérot accordable intégrant une membrane-miroir concave par flambement pour les applications à la spectroscopie.** Lieu de soutenance: Université de Franche-compté, (2005), p 165
- [Tormen 2006] Tormen M., Peter Y.-A., Niedermann P., Hoogerwerf A., Shea H. and Stanley R. **Deformable MEMS grating for wide tunability and high operating speed.** J Opt A: Pure Appl Opt, (2006), p 61140C-61140C. <http://dx.doi.org/10.1117/12.644523>
- [Tyan 1997] Tyan R.-C., Salvekar A.A., Chou H.-P., Cheng C.-C., Scherer A., Sun P.-C., Xu F. and Fainman Y. **Design, fabrication, and characterization of form-birefringent multilayer polarizing beam splitter.** J Opt Soc Am A, July 01 (1997), 14(7), p 1627-1636. <http://dx.doi.org/10.1364/JOSAA.14.001627>
- [Underwood 1972] Underwood R.W. **Aerial Cameras, Aerial Films, and Film Processing** [en ligne]. Center Operations Directorate Manned Spacecraft Center, NASA, (1972). Lien: http://ia600507.us.archive.org/19/items/nasa_techdoc_19730078848/19730078848.pdf >(consulté le 18/05/2013)
- [Vulto 2004] Vulto P., Glade N., Altomare L., Bablet J., Medoro G., Leonardi A., Romani A., Chartier I., Manaresi N., Tartagni M. and Guerrieri R. **Dry film resist for fast fluidic prototyping.** Proc. MicroTAS 2004, Malmö : Suède, December (2004),p 43-45.

-
- [Winchester 2001] Winchester K.J. and Dell J.M. **Tunable Fabry-Pérot cavities fabricated from PECVD silicon nitride employing zinc sulphide as the sacrificial layer.** Journal of Micromechanics and Microengineering, August 9 (2001), 11(5), p 589. <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/11/5/323>
- [Wu 2006] Wu M.C., Solgaard O. and Ford J.E. **Optical MEMS for Lightwave Communication.** Lightwave Technology, (2006), 24(12), p 4433-4454. <http://dx.doi.org/10.1109/ILT.2006.886405>
- [Yamanoi 2008] Yamanoi T., Endo T. and Toshiyoshi H. **A hybrid-assembled MEMS Fabry-Pérot wavelength tunable filter.** Sens Actuators A Phys, July-August (2008), 145-146(0), p 116-122. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2007.10.080>
- [Zamkotsian 2003] Zamkotsian F., Camon H., Fabre N., Conedera V. and Moreaux G. **Micro-deformable mirror for next-generation adaptive optical systems.** Proc. SPIE, Waikoloa, Hawai'i, USA, August 22 (2003), p 711-720. <http://dx.doi.org/10.1117/12.458845>
- [Zhang 2007] Zhang B. **Design, modeling and simulation of a novel micro-electro-mechanical gyroscope with optical readouts.** Lieu de soutenance: Cape Peninsula University of Technology, (2007), p 232
- [Zhang 2006] Zhang Y. and Zhao Y.-p. **Applicability range of Stoney's formula and modified formulas for a film/substrate bilayer.** J Appl Phys, March (2006), 99(5), p 053513-053517. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2178400>

Résumé

L'imagerie multispectrale permet d'améliorer la détection et la reconnaissance de cibles dans les applications de surveillance. Elle consiste à analyser des images de la même scène acquises simultanément dans plusieurs bandes spectrales grâce à un filtrage. Cette thèse étudie la possibilité de réaliser une matrice de 4 filtres Fabry Pérot (FP) intégrés 3D et ajustables par actionnement électrostatique dans le domaine visible-proche infrarouge. Les miroirs fixes des filtres FP sont des multicouches ZnS/YF₃ déposés sur un wafer de borosilicate, et les miroirs mobiles sont des membranes multicouches PECVD Si_xN_yH_z/Si_xO_yH_z encastrées sur une structure mobile très compacte micro-usinée dans un wafer en silicium. Les performances optiques des filtres FP ont été optimisées en prenant en compte la dissymétrie et le déphasage à la réflexion des miroirs. La structure mobile a été modélisée par éléments finis pour minimiser ses déformations lors de l'actionnement. Les étapes critiques des procédés de fabrication des miroirs mobiles en technologie Si ou SOI ont été mises au point : i) la fabrication et la libération par gravures profondes DRIE et XeF₂ des membranes multicouches avec une contrainte résiduelle ajustée par recuit et une réflectance voisine de 50% dans une large gamme spectrale, ii) le contrôle des vitesses de la gravure DRIE avec des motifs temporaires permettant la gravure simultanée de motifs de largeur et de profondeur variables, et iii) la délimitation de motifs sur surfaces fortement structurées à l'aide de pochoirs alignés mécaniquement ou de films secs photosensibles. Ces travaux ouvrent la voie vers une réalisation complète d'une matrice de filtres FP intégrés 3D.

Mots clés : Fabry Pérot, MOEMS, imagerie multispectrale, intégration 3D, membrane, miroir diélectrique, contraintes résiduelles, planéité, PECVD, DRIE, XeF₂, masque stencil, alignement de wafers, films secs

Abstract

Multispectral imaging is used to improve target detection and identification in monitoring applications. It consists in analyzing images of the same scene simultaneously recorded in several spectral bands owing to a filtering. This thesis investigates the possibility to realize, an array of four 3D integrated Fabry-Perot (FP) filters that are tunable in the visible-near infrared range by electrostatic actuation. The fixed mirrors of the FP filters are ZnS/YF₃ multilayers deposited on a borosilicate wafer, and the movable mirrors are PECVD Si_xN_yH_z/Si_xO_yH_z multilayer membranes clamped in a very compact movable structure micromachined in a Si wafer. A 3rd glass wafer is used for filters packaging. Optical performances of the FP filters have been optimized by taking into account the asymmetry and the reflection phase shift of the mirrors and the mobile structure has been modeled by finite elements analysis notably to minimize its deformation during actuation. The critical steps of the movable mirrors fabrication process in Si or SOI technology have been developed : i) the fabrication and the release by DRIE and XeF₂ etching of 8 or 12 layers membranes with a residual stress tunable by annealing and a reflectance close to 50% in broad wavelength range (570-900nm), ii) the control with temporary patterns of the simultaneous deep etching of patterns with different widths and depths, and iv) various patterning techniques on highly structured surfaces based on shadow masks (with mechanical alignment) or laminated photosensitive dry films. These results open the way towards the full realization of an array of 3D integrated FP filters.

Keywords : Fabry Perot, MOEMS, multispectral imaging, 3D integration, membrane, dielectric mirror, residual stress, flatness, PECVD, DRIE, XeF₂, shadow mask, wafer alignment, dry film