

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**MICROFABRICATION D'UN CRISTAL
PHOTONIQUE À 1D ACCORDABLE EN
LONGUEUR D'ONDE**

FATOU BINETOU KONÉ
DÉPARTEMENT DE GÉNIE PHYSIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE PHYSIQUE)

AVRIL 2008



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence
ISBN: 978-0-494-41566-5
Our file Notre référence
ISBN: 978-0-494-41566-5

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

MICROFABRICATION D'UN CRISTAL PHOTONIQUE À 1D ACCORDABLE EN
LONGUEUR D'ONDE

présenté par : KONÉ Fatou Binetou

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

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

M. GUENAT Olivier, Ph.D., président

M. PETER Yves-Alain, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. GODBOUT Nicolas, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. KASHYAP Raman, Ph.D., membre

À Vous...

Remerciements

Mes premiers remerciements vont bien assurément à mes parents pour leur affection, leur présence, leur support indéfectible...pour tout simplement TOUT.

Merci à Yves-Alain Peter, mon professeur et directeur de maîtrise pour tout d'abord m'avoir fait découvrir le monde fascinant de la microfabrication et des MEMS, puis pour m'avoir donné la chance de réaliser ce projet sous sa supervision.

Merci à Nicolas Godbout, pour avoir bien voulu me codiriger dans le cadre de ce projet, et pour son aide en ce qui a trait à la partie optique de ma recherche.

Merci à Olivier Guenat et Raman Kashyap pour votre participation au jury et pour le temps consacré à l'évaluation de ce travail.

Je ne pourrais assez remercier les membres du LMF pour leur support tout au long du projet: merci Marie-Hélène pour l'ensemble de ton œuvre au LMF qui fait que nous puissions mener à bien nos recherches dans ce laboratoire; merci à toi Philippe d'avoir si généreusement partagé ton savoir et d'avoir été si patient avec mes innombrables questions dans le fab; merci à Olivier, à Sébastien, à Souleymane, à Dominique et aux autres que j'oublie peut être de citer.

Je tiens aussi à adresser mes remerciements aux autres étudiants du groupe des Micro et Nano Systèmes car votre collaboration a été essentielle à la réalisation de ce travail : merci donc à Philippe Calmès, à Jonathan Masson et à Sacha Bergeron.

Merci à Frédéric Roy pour le partage des longues heures de programmation MATLAB et de rédaction, pour les innombrables services rendus et bien plus encore.

Enfin, je voudrais remercier ma famille, mes amis, et tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à cet accomplissement.

Résumé

Dans le présent mémoire, les travaux portant sur l'élaboration d'un cristal photonique à une dimension accordable en longueur d'onde sont détaillés. L'objectif de ce projet est de mettre en place une technologie de filtrage en longueur d'onde qui soit extrêmement compacte, peu coûteuse, accordable en longueur d'onde avec un contrôle précis et rapide et aussi facile à intégrer dans différentes applications.

Une telle technologie peut être utilisée dans l'industrie des télécommunications afin de remplacer une série de filtres nécessaires au démultiplexage des données transmises par fibre optique par un filtre unique. D'autres domaines d'applications tels que le biomédical, par exemple, pour la détermination d'indice de réfraction de certains fluides, sont envisageables. À l'heure actuelle, la technologie la plus utilisée en termes de filtre étroit en télécommunication optique est celle des réseaux de Bragg fibrés. Néanmoins, avec l'avènement des microsystèmes électro-mécaniques (MEMS), de nouveaux dispositifs ont commencé à être développés. En effet, la combinaison de ces éléments électro-mécaniques avec des éléments optiques offre beaucoup de possibilités pour l'« accordabilité » en longueur d'onde. Ces dispositifs facilitent aussi l'alignement des fibres optiques et l'originalité de celui qui est proposé dans ce projet réside dans l'actionnement individuel de chacun des réflecteurs qui le composent. La microfabrication de structures avec des miroirs gravés verticalement dans le silicium comporte de nombreux défis. Dans le cadre de cette maîtrise, il s'agissait de mettre au point et d'optimiser les étapes du procédé de microfabrication du filtre, puis d'effectuer quelques caractérisations afin de démontrer la faisabilité du concept avec les MEMS ainsi obtenus. Un procédé utilisant la gravure profonde du silicium par DRIE sur un substrat de silicium-sur-isolant (SOI) a ainsi été développé, et des structures ayant des murs d'une rugosité RMS de 16 nm et pouvant être actionnés avec une tension de 40 V ont été fabriqués.

Mots-clés : Cristaux Photoniques 1D, réseau de Bragg, accordable, silicon-on-insulator (SOI), deep reactive ion etching (DRIE), actionneurs électrostatiques.

Abstract

Photonic band gap structures exhibit tremendous filtering abilities that open the way to a wide range of applications in the optical communications field but also in fiber lasers or the detection of chemical and biological species. Being able to control and adjust at will the band gap of such optical components have recently been investigated and could be realized by the integration of the photonic crystals with micro-electro-mechanical systems (MEMS). An innovative design of an optical MEMS, made of a network of silicon Bragg walls with air spacing, individually tuned with electrostatic comb actuators, has therefore been developed.

Microfabricated silicon gratings are external devices that offer a flexible and easy to integrate way of selecting wavelength. They greatly facilitate optical fiber alignment and the proposed one brings forward the unique feature of moving independently each individual reflector. In-plane designs with mirrors vertically etched in the substrate represent quite a challenge in terms of microfabrication. Therefore, a method was developed, that uses deep reactive ion etching (DRIE) on a silicon-on-insulator (SOI) substrate to define in the same step the silicon walls and the grooves for the optical fiber. Smooth vertical walls with 16 nm RMS roughness were fabricated with this method and they were actuated with voltages less than 40V. The design concept and detailed microfabrication process as well as electro-mechanical and optical results will be presented in this thesis.

Keywords : Tunable optical filter, Bragg gratings, 1D photonic crystal, silicon-on-insulator (SOI), deep reactive ion etching (DRIE), electrostatic actuator

Table des matières

DÉDICACE.....	iv
REMERCIEMENTS.....	v
RÉSUMÉ.....	vi
ABSTRACT.....	vii
TABLE DES MATIÈRES.....	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES FIGURES.....	xi
LISTE DES ANNEXES.....	xiv
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 Théorie.....	4
1.1 Les Réseaux de Bragg.....	4
1.2 Les peignes électrostatiques.....	9
CHAPITRE 2 Présentation du dispositif et de ses précurseurs.....	12
2.1 État de l'art.....	13
2.1.1 Les réseaux de Bragg à fibre.....	13
2.1.2 Les empilements « horizontaux » de diélectriques (hors-plan)	15
2.1.3 Les réseaux de Bragg « verticaux » (dans le plan).....	21
2.2 Réflecteurs de Bragg en silicium actionnés individuellement	25
CHAPITRE 3 Fabrication.....	29
3.1 Présentation des méthodes de fabrication	29
3.1.1 Méthode 1 : Masque de chrome pour la gravure DRIE sur SOI 10 μm	30
3.1.2 Méthode 2 : Masque de résine pour la gravure DRIE sur SOI 10 μm	31
3.1.3 Méthode 3 : Masque de résine pour la gravure DRIE sur SOI 70 μm	32
3.2 Développement de la méthode 1	33
3.2.1 Gravure par faisceau d'ions focalisé.....	34
3.3 Développement des méthodes 2 et 3	37
3.3.1 Photolithographie	37
3.3.2 Gravure profonde DRIE par plasma ICP	47

3.3.3 Décapage de la photorésine.....	53
3.3.4 Libération des structures	53
3.4 Résultats de fabrication	57
CHAPITRE 4 Caractérisation	62
4.1 Caractérisation mécanique	62
4.1.1 Description du montage	62
4.1.2 Résultats et analyse	63
4.2 Caractérisation électrique.....	64
4.2.1 Description du montage	64
4.2.2 Résultats et analyse	65
4.3 Caractérisation optique.....	66
4.3.1 Analyse de la surface des miroirs.....	66
4.3.2 Description du montage	69
4.3.3 Résultats et analyse	70
CONCLUSION	77
BIBLIOGRAPHIE	78
ANNEXES	84

Liste des tableaux

Tableau A1.1 Comparaison des différents réseaux de Bragg présentés	84
Tableau A4.1 Paramètres de la recette de photolithographie avec la SP 1813	91
Tableau A6.1 Paramètres de la recette de photolithographie avec la SPR 220 7.0	96
Tableau A6.2 Paramètres de la recette de photolithographie avec la SPR 220 3.0	96
Tableau A7.1 Paramètres optimisés de la gravure DRIE.....	97

Liste des figures

Figure 1.1 Réseau de Bragg	4
Figure 1.2 Réflexions aux interfaces pour 1 mur du réseau périodique.....	5
Figure 1.3 Simulation de la réflectivité en fonction du nombre de murs de silicium [24]	7
Figure 1.4 Simulation de la réponse spectrale du filtre en fonction de l'ordre de réflexion [24]	8
Figure 1.5 Représentation schématique de l'ouverture numérique d'une fibre optique	9
Figure 1.6 Schéma d'un peigne électrostatique interdigité.....	10
Figure 1.7 Principe de fonctionnement du peigne électrostatique	11
Figure 2.1 Réseau de Bragg inscrit dans le cœur d'une fibre optique	14
Figure 2.2 Vue de dessus (a) et en coupe (b) du filtre optique accordable (Exemple 1, [12])	16
Figure 2.3 Vue en coupe du filtre en InP-air (Exemple 2, [13])	18
Figure 2.4 Vues en coupe et en 3D du filtre en Si et SiO ₂ actionné thermiquement	19
(Exemple 3, [14])	19
Figure 2.5 Vue en coupe du filtre en Si et SiO ₂ actionné par électrostatique (Exemple 4, [15]).....	20
Figure 2.6 Vues de dessus et en coupe du filtre en Si et SiO ₂ actionné thermiquement (Exemple 5, [17]); schéma des couches du dispositif.....	22
Figure 2.7 a) Schéma en coupe du principe de filtrage du dispositif; Images SEM (b et d) et 3D (c) de la microstructure (exemple 6, [18]).....	24
Figure 2.8 Schéma du dispositif proposé : a) vue générale; b) zoom sur les réflecteurs	26
Figure 2.9 Modèle en 3 dimensions du dispositif avec une fibre optique alignée.....	27
Figure 3.1 Étapes de la méthode de fabrication #1	31
Figure 3.2 Étapes de la méthode de fabrication #2	32
Figure 3.3 Étapes de la méthode de fabrication #3	33
Figure 3.4 Masque gravé dans le chrome par faisceau d'ions focalisé.....	35
Figure 3.5 Pics produits à la gravure DRIE par le micromasquage des particules de chrome (« grass »).....	36

Figure 3.6 Masque 1 : moitié supérieure avec structures.....	38
Figure 3.7 Motifs test de photolithographie.....	39
Figure 3.8 Motifs tests de lithographie réalisés dans la résine.....	40
Figure 3.9 Motifs tests pour la gravure DRIE ICP	41
Figure 3.10 Masque 2 : répartition des motifs dans les cadrans identifiés 1 à 3.....	42
Figure 3.11 Motifs d'alignement a) structure 1 : support d'alignement; b) structure 2 : croix d'alignement.....	42
Figure 3.12 Croix alignée avec son support :a) motif entier; b) zoom sur les détails de la croix.....	43
Figure 3.13 Réaction chimique à la surface du substrat lorsque le HMDS est appliqué [42]	45
Figure 3.14 Schéma d'une chambre de gravure DRIE ICP [43].....	48
Figure 3.15 Procédé de gravure BOSCH [43]	49
Figure 3.16 « Scalloping » observé sur les parois de silicium suite à une gravure BOSCH	50
Figure 3.17 Images SEM de structures collées au substrat suite à une libération par HF liquide.....	54
Figure 3.18 Système de gravure par HF en phase vapeur [44]	55
Figure 3.19 Images SEM de structures libérées sans collage, par HF vapeur	55
Figure 3.20 Diagramme de phase du CO ₂ et points d'opération du CPD [45]	56
Figure 3.21 Image SEM d'un peigne électrostatique gravé dans le silicium (SOI de 10 µm) et relâché sans stiction grâce au séchage avec le « critical point dryer ».....	57
Figure 3.22 Image SEM d'une structure relâchée sur SOI 10 µm: vue d'ensemble des murs de Bragg et de ressorts servant de support aux peignes mobiles.	58
Figure 3.23 Image SEM des murs réflecteurs de Bragg après relâchement sur SOI 10 µm	59
Figure 3.24 Image SEM d'une structure gravée et libérée sur SOI 70 µm (vue d'ensemble)	60
Figure 3.25 Image SEM d'une structure gravée et relâchée sur SOI 70 µm (zoom sur les murs réflecteurs de Bragg).....	61

Figure 4.1 Montage de tests mécaniques : à gauche, vue d'ensemble du microscope; à droite, vue rapprochée de la pointe de verre.	62
Figure 4.2 Points d'exercions de pression avec la pointe de verre sur la structure.....	63
Figure 4.3 Illustration de ressorts compressés sur le dispositif.....	64
Figure 4.4 a) Station de tests sous pointes; b) Schéma du montage	65
Figure 4.5 Sites des mesures AFM (schéma explicatifs des positions où les mesures AFM ont été effectuées et illustration de ces sites sur image SEM)	67
Figure 4.6 Schématisation 3D du balayage AFM des parois gravées (Site 0).....	68
Figure 4.7 Analyse de rugosité par AFM sur les parois gravées (Site 0)	68
Figure 4.8 Schéma du montage de caractérisation optique.....	69
Figure 4.9 Spectre de référence de la source (diode à $\lambda=1550\text{nm}$).....	70
Figure 4.10 Spectre de réflexion de la structure fabriquée (première testée)	71
Figure 4.11 Spectre de réflexion de la structure fabriquée (deuxième testée).....	72
Figure 4.12 Spectre de réflexion de la structure fabriquée (troisième testée).....	73
Figure 4.13 Spectre de réflexion de la structure fabriquée (quatrième testée).....	74
Figure 4.14 Dimensions mesurées au final sur les structures (sur image SEM).....	76

Liste des annexes

Annexe 1 : Comparaison des différents réseaux de Bragg présentés.....	84
Annexe 2 : HEXAMETHYLDISILANE.....	85
Annexe 3 : Fiche signalétique de la SP1813.....	86
Annexe 4 : Paramètres utilisés pour l'application de la SP1813	91
Annexe 5 : Fiche signalétique de la SPR 220	92
Annexe 6 : Paramètres utilisés pour l'application de la SPR 220.....	96
Annexe 7 : Paramètres optimisés de la gravure DRIE.....	97

INTRODUCTION

Dans les semiconducteurs, la périodicité atomique empêche la propagation des électrons dont l'énergie est située dans une zone appelée bande interdite (gap). En inhibant la propagation des photons de façon similaire par la création d'une périodicité artificielle dans des matériaux diélectriques, le concept de bande interdite photonique a été développé. C'est ainsi que sont nés les cristaux photoniques, ce qui a ouvert la voie à de nombreux travaux. La forme la plus simple de cristal photonique est une structure périodique à une dimension composée d'un empilement multicouche également appelé « miroir de Bragg ». Ce dispositif est constitué d'une succession de couches de matériaux transparents dont les indices de réfraction sont différents. A chaque interface entre deux couches, la lumière est partiellement réfléchi et transmise. Selon la valeur des déphasages des différentes ondes transmises, on obtient en sortie des interférences constructives ou destructives. Dans ce dernier cas, le dispositif se comporte comme un miroir, qui est donc sélectif en longueur d'onde (seule la fraction de lumière de longueur d'onde satisfaisant la condition de Bragg est réfléchi). Les cristaux photoniques à deux dimensions ont aussi atteint le niveau de maturité nécessaire pour le développement d'applications [1]. Un exemple de cristal photonique à 2D est une matrice de trous d'air périodiquement creusés dans un matériau semiconducteur ; en « enlevant » des trous dont la position est soigneusement sélectionnée, il est possible de générer des circuits intégrés photoniques. La fabrication de cristaux photoniques à trois dimensions est plus complexe et des méthodes de fabrication par auto assemblage sont investiguées entre autres techniques [2]. La structuration périodique doit être de l'ordre de la longueur d'onde, d'où l'utilisation de méthodes de nanofabrication afin de réaliser les structures.

Ces méthodes de fabrication à très petite échelle ont initialement été développées pour répondre aux besoins croissants de miniaturisation de la microélectronique. Toutefois, d'autres développements en ont découlé dont les MEMS. Les Microsystèmes Électro-Mécaniques sont des instruments électro-mécaniques miniaturisés dont au moins une

dimension est de l'ordre de quelques micromètres. Les MEMS ont permis d'intégrer des éléments mécaniques, des capteurs, des actionneurs ainsi que des éléments électroniques sur un seul et même support de silicium pour former des systèmes sur puce. C'est ainsi qu'une multitude de capteurs microscopiques ont envahi les marchés de l'automobile, de l'industrie manufacturière et les produits de grande consommation de manière générale. De l'accéléromètre [3] au gyroscope [4] en passant par le capteur de pression [5], le microphone [6] ou le détecteur de virus [7], les MEMS savent allier des fonctionnalités reposant sur des principes physiques simples à une compacité, une flexibilité et une facilité d'intégration inégalées, le tout à des prix défiant toute concurrence [8]. Les applications sont innombrables et les limitations proviennent surtout du contrôle de la fabrication à des dimensions atteignant les quelques dizaines de rangées d'atomes. L'utilisation des propriétés des MEMS pour des applications optiques a donné le jour au concept de Microsystèmes Opto-Electro-Mécaniques (MOEMS).

Avec l'avènement des MOEMS, les cristaux photoniques connaissent un nouvel élan [9-10]. Le développement des cristaux photoniques accordables en longueur d'onde [11] suscite un intérêt important du fait des innombrables possibilités que de tels dispositifs peuvent offrir. En effet, les cristaux photoniques permettent d'une part de filtrer des longueurs d'onde de manière très sélective, et d'autre part, ils sont en mesure de contrôler précisément la bande passante et de la faire varier à volonté. Ces nouvelles fonctionnalités pourraient être utilisées dans une plusieurs applications. Par exemple, en communication optique, la quantité d'informations transportée par les fibres optiques est de plus en plus importante et des paquets de longueurs d'ondes sont ainsi envoyés. En bout de ligne, la séparation de ces paquets de longueurs d'ondes nécessite un filtrage très précis à l'aide de dispositifs de démultiplexage (WDM). Les cristaux photoniques accordables pourraient donc constituer une solution compacte et pratique pour de telles applications.

Beaucoup de recherches ont été consacrées, et le sont encore, à l'élaboration de cristaux photoniques utilisant les propriétés des réseaux de Bragg. Au départ, c'étaient pour la plupart des structures « hors du plan », constituées d'empilements de couches

diélectriques [12-15]. L'« accordabilité » de ces dispositifs est très réduite et ils supplantent difficilement les très répandus réseaux de Bragg fibrés [16]. Ceux-ci sont inscrits à même les fibres optiques et n'offrent pas autant de flexibilité que les réseaux microfabriqués.

Plus récemment, des efforts ont été déployés pour faire des dispositifs « dans le plan », dont les réflecteurs sont gravés verticalement dans le substrat [17-18]. Malgré les difficultés qu'ils comportent en termes de microfabrication, ils suscitent beaucoup d'intérêt. Cela est dû au fait qu'ils permettent d'intégrer différents types d'actionneurs, tout en facilitant grandement l'alignement des fibres optiques. Ces propriétés, entre autres, en font d'excellents candidats pour des sélecteurs de longueur d'onde en démultiplexage ou dans des lasers à large bande. Leur utilisation pourrait aussi être considérée dans des lasers tout fibre [19] ou des applications biomédicales pour la mesure d'indices de réfraction de substances injectées entre les murs réflecteurs.

Ce projet consiste à développer un procédé de microfabrication pour un design novateur d'un cristal photonique unidimensionnel accordable en longueur d'onde. Le design proposé est constitué de réflecteurs de Bragg gravés verticalement dans du silicium, actionnés individuellement par des peignes interdigités électrostatiques. La structure ainsi élaborée se voulait très compacte, facilement reproductible à grande échelle, et totalement contrôlable avec beaucoup de précision. De plus, elle a été prévue pour être actionnée d'une façon rapide (de l'ordre du dixième de seconde) et précise (calibration de la tension appliquée vs la longueur d'onde filtrée) et pour offrir une large plage de longueurs d'onde accordable, avec une longueur d'onde centrée à 1550 nm.

Les travaux réalisés dans le cadre de ce projet de maîtrise ont fait l'objet d'une présentation d'affiche scientifique à la conférence IEEE LEOS Optical MEMS 2006 [20].

CHAPITRE 1 Théorie

1.1 Les Réseaux de Bragg

Un réseau de Bragg est une structure avec une perturbation d'indice périodique telle qu'une excellente réflectivité peut être obtenue à la longueur d'onde satisfaisant à la condition de Bragg. En physique du solide, la loi de Bragg stipule que des ondes incidentes sur une structure cristalline subissent des réflexions partielles à chaque « interface » constituée par les plans parallèles du cristal et que, pour que le total des ondes réfléchies soient en phase, il faut que la condition suivante soit respectée :

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (1)$$

Où n est un entier, d est la distance entre les plans, θ est l'angle d'incidence et λ est la longueur d'onde incidente [21].

Dans les miroirs ou réflecteurs de Bragg, le même principe est utilisé à un niveau macroscopique. Ce sont ainsi des structures constituées d'une séquence alternative de couches de deux matériaux optiquement différents (indices de réfraction différents), dont l'épaisseur correspond à un quart de la longueur d'onde pour laquelle le miroir est conçu (cf. figure 1.1).

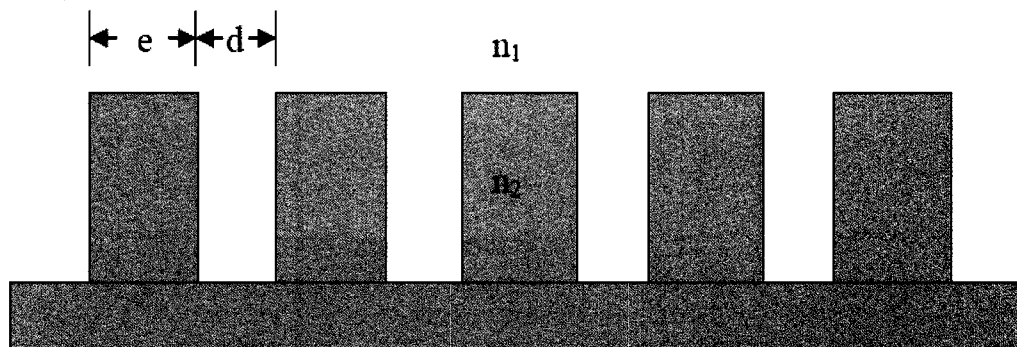


Figure 1.1 Réseau de Bragg

Le principe d'opération est simple et découle de la loi de Bragg. Chaque interface entre les deux matériaux contribue à une réflexion de Fresnel. Pour la longueur d'onde désirée, la différence de chemin optique entre les réflexions aux interfaces qui se suivent est égale à la moitié de la longueur d'onde; de plus, les coefficients de réflexion aux interfaces sont alternativement de signes opposés. Ainsi, toutes les composantes réfléchies aux interfaces interfèrent constructivement (cf. figure 1.2). Il en résulte, pour chacune des couches du réseau, une réflexion maximale de la longueur d'onde de Bragg λ à la condition suivante :

$$\Lambda = \frac{N\lambda}{4n} \quad (2)$$

où Λ est l'épaisseur de la couche (correspond à d pour le silicium et e pour l'air à la figure 1.1), n est l'indice de réfraction de la couche (à la figure 1.1, n_1 est l'indice de réfraction de l'air tandis que n_2 est celui du silicium), et N est un entier représentant l'ordre de la réflexion.

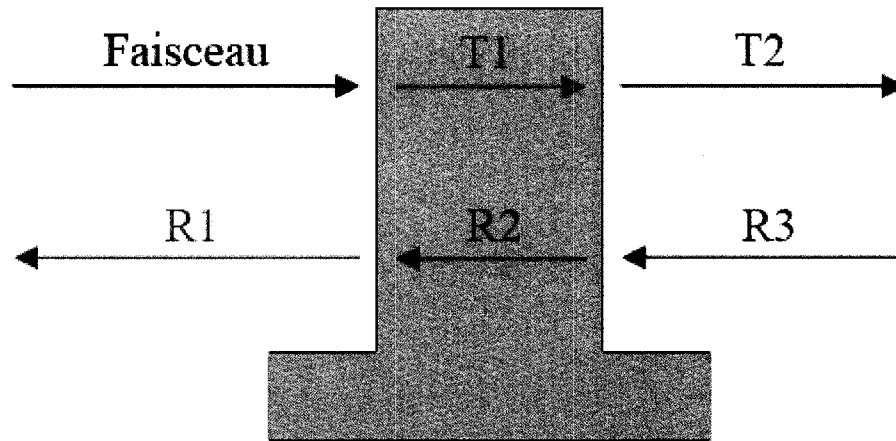


Figure 1.2 Réflexions aux interfaces pour 1 mur du réseau périodique

L'effet de chacune des couches du réseau sur la lumière incidente peut être déterminé grâce au formalisme matriciel [22]. La méthode matricielle est un outil permettant de décrire le changement d'orientation des faisceaux lumineux à chaque interface ainsi que la propagation des faisceaux lumineux dans un milieu homogène. Ainsi, chacune des couches du réflecteur peut être représentée par une matrice de transfert qui va s'exprimer de la manière suivante [23]:

$$M_j = \begin{Bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{n_j} \sin \delta_j \\ in_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{Bmatrix} \quad (3)$$

où

$$\delta_j = \frac{2\pi n_j d_j}{\lambda} \quad (4)$$

n_j étant l'indice de réfraction de la couche, d_j , son épaisseur et λ , la longueur d'onde incidente.

Le produit des matrices représentant chacune des couches de silicium et d'air permet de déterminer la matrice globale du système et donc l'effet du filtre sur la lumière incidente :

$$M = \begin{Bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{Bmatrix} = \prod_{j=1}^N M_j \quad (5)$$

où N représente ici le nombre total de couches ayant chacune leur matrice de transfert M_j .

La réflectivité du système peut alors être exprimée de la manière suivante :

$$R = 1 - \frac{4}{(m_{11} + m_{22})^2 + (m_{12} + m_{21})^2} \quad (6)$$

La réflectivité ainsi obtenue est déterminée par le nombre de paires et par le rapport des indices de réfraction entre les deux couches utilisées.

À partir de là, des simulations ont ainsi été réalisées [24] afin de déterminer l'impact du nombre de murs de silicium (nombre de périodes du réseau) sur la réflectivité. La figure 1.3 illustre les courbes normalisées de réflectivité pour 3 filtres Si/air composés de 1, 2 et 5 périodes.

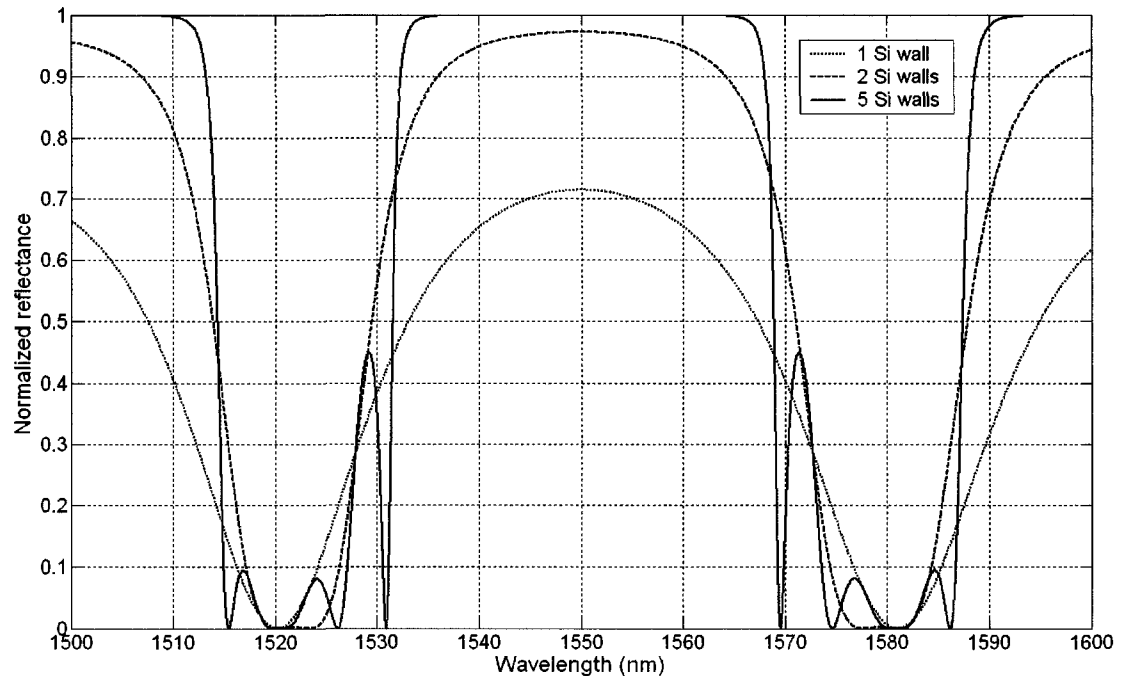


Figure 1.3 Simulation de la réflectivité en fonction du nombre de murs de silicium [24]

Les résultats de simulations montrent qu'une réflectivité de 95% à la longueur d'onde centrale d'opération du réseau ($\lambda=1550$ nm sur la figure 1.3) peut être obtenue avec aussi peu que deux murs de silicium. Cette propriété est attribuable au rapport d'indice élevé du silicium et de l'air qui est de 3,45.

Par ailleurs, pour un nombre de murs et rapport d'indices fixés, l'effet du changement d'ordre de réflexion, donc de la variation d'épaisseur sur la réponse spectrale du filtre (cf. équation), a été simulé (cf. figure 1.4).

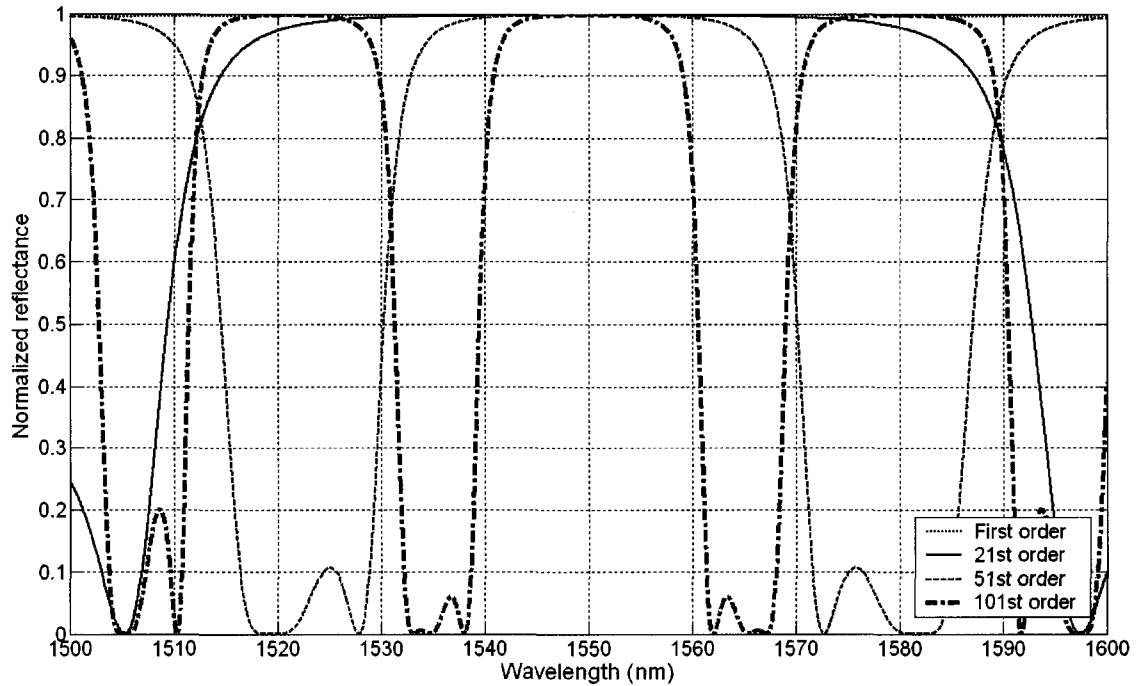


Figure 1.4 Simulation de la réponse spectrale du filtre en fonction de l'ordre de réflexion [24]

Les 1^{er}, 21^{ème}, 51^{ème} et 101^{ème} ordres sont représentés sur la courbe de simulation illustrée. Le premier ordre est à peine visible car la largeur de bande dépasse la bande de longueurs d'onde représentée qui est ici de 100 nm (de 1500 nm à 1600 nm). Au 101^{ème} ordre, la largeur de la bande de réflexion est de 20 nm. Les ordres élevés de réflexion permettent ainsi de réduire la largeur de la bande de réflexion du réseau de Bragg.

Néanmoins, ces équations, ainsi que les simulations présentées, supposent une incidence normale du faisceau sur les murs du filtre. Hors, la lumière incidente sur le filtre provient d'une fibre optique et est donc émise avec une certaine ouverture numérique [25], tel qu'illustré sur le schéma de la figure 1.5. Cette ouverture numérique est un indice représentant la gamme d'angles sur lesquels la lumière peut être émise en sortant de la fibre optique.

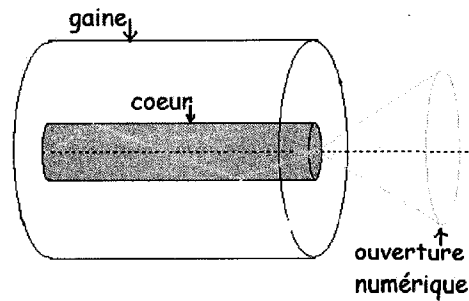


Figure 1.5 Représentation schématique de l'ouverture numérique d'une fibre optique

La lumière n'arrive donc pas forcément à incidence normale sur les murs réflecteurs ce qui induit des pertes.

1.2 Les peignes électrostatiques

Dans les microsystèmes électromécaniques, le mouvement des pièces mobiles est assuré par des actionneurs. Ceux-ci sont de différents types, dépendamment de leur configuration et de leur principe de fonctionnement. Dans le cas présent, le choix s'est porté sur l'actionnement par des peignes électrostatiques interdigités (cf. figure 1.6).

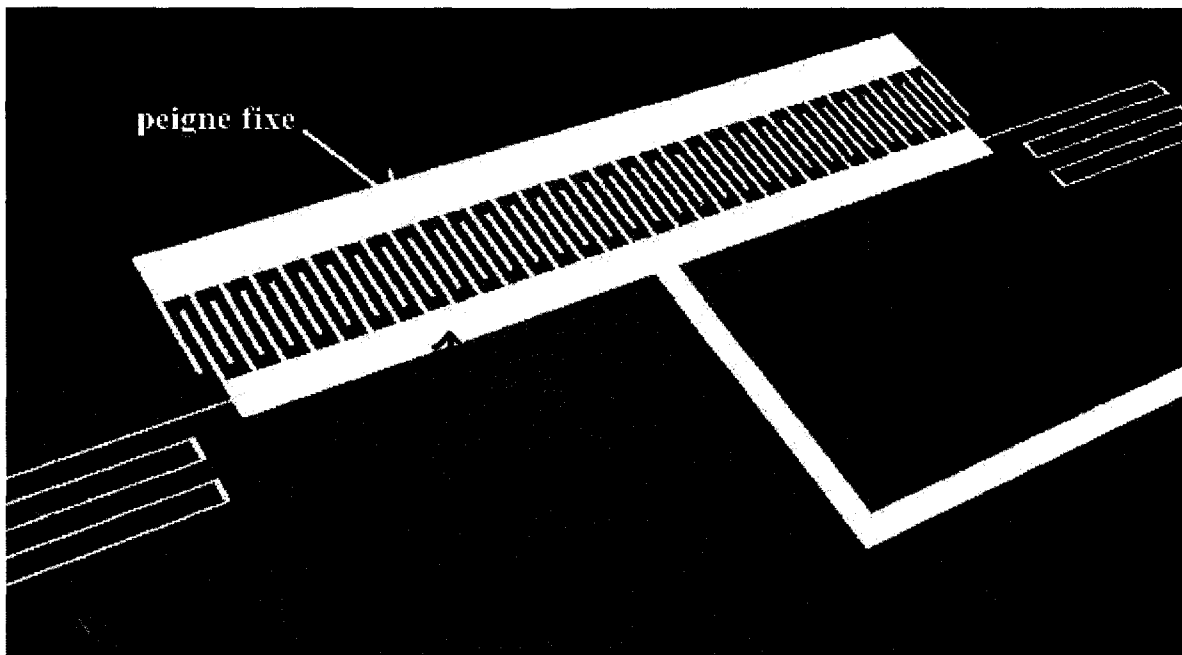


Figure 1.6 Schéma d'un peigne électrostatique interdigité

Les peignes électrostatiques, comme leur nom l'indique, sont des structures qui ressemblent à une paire de peignes dont les doigts sont entrecroisés. Dans ces structures, l'un des peignes est fixé sur le substrat tandis que l'autre peigne est suspendu, souvent par l'intermédiaire de ressorts qui le relie au substrat.

Le principe de fonctionnement de cet actionneur est simple et repose sur la variation de la capacité entre les doigts des peignes. En effet, chaque paire de doigts de peignes constitue un condensateur plan (effet de plaques parallèles entre deux doigts). Ainsi, lorsqu'une différence de potentiel est appliquée entre les deux peignes, le peigne mobile est attiré vers le peigne fixe du fait de la force électrostatique résultante. Le mouvement du peigne fixe permet alors de faire bouger la structure mobile du microsystème.

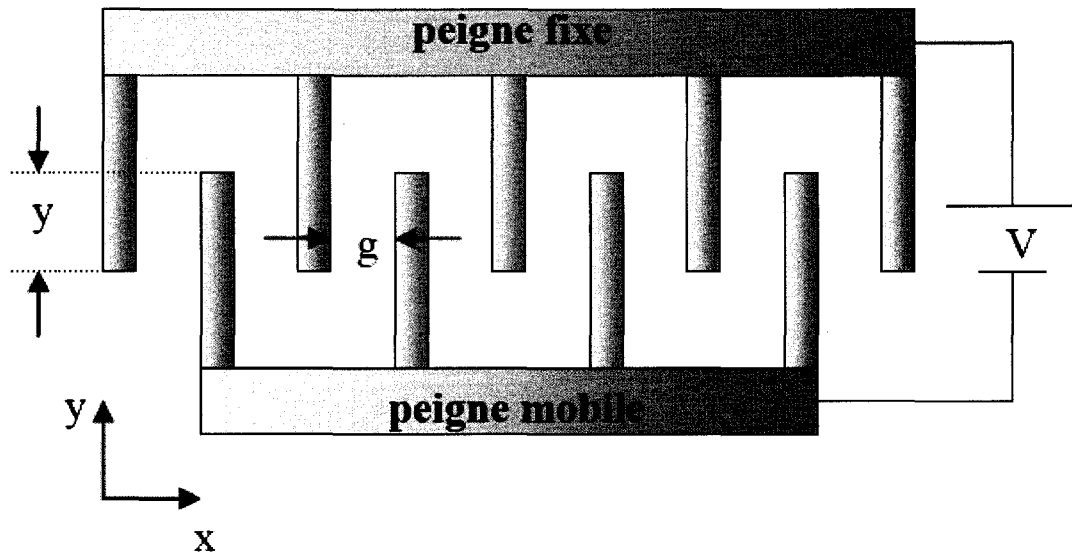


Figure 1.7 Principe de fonctionnement du peigne électrostatique

La force résultant de l'application de la tension est de :

$$F \approx M \frac{h}{g} \epsilon_0 V^2 \quad (7)$$

Où M est le nombre de doigts, h est l'épaisseur des doigts en z (largeur des plaques parallèles), ϵ_0 est la permittivité du vide et g la distance entre les doigts (cf. figure 1.7) [26]. Les espacements entre les doigts des peignes sont petits par rapport à h , il en résulte une force en x importante qui tend à amener les doigts à se coller. Cependant, si les doigts du peigne mobile restent parfaitement centrés par rapport au gap entre deux doigts du peigne fixe, les forces en x sur les deux faces se compensent.

Les peignes électrostatiques restent des structures instables car elles sont très sensibles à la disposition des peignes mobiles au centre des espacements des peignes fixes par exemple. Aussi, il est primordial de faire en sorte que la constante de ressort dans la direction où le mouvement est désiré est largement inférieure à celle dans toute autre direction possible.

Zhao et al. ont démontré que dans le cas d'une direction de mouvement en y, sachant que les constantes de ressort dans les directions x et y sont respectivement K_x et K_y , il faut que la relation suivante soit satisfaite [27] :

$$K_x \gg \frac{y^2 K_y}{g^2} \quad (8)$$

où g représente l'espacement entre les peignes et y la longueur de peigne mobile qui se retrouve entre les peignes fixes (cf. figure 1.7).

CHAPITRE 2 Présentation du dispositif et de ses précurseurs

Les propriétés des réseaux de Bragg sont intéressantes pour de nombreuses applications avec les fibres optiques telles que :

- les filtres à bande large ou étroite accordables,
- les convertisseurs de mode dans les fibres optiques,
- les multiplexeurs en longueur d'onde,
- les compensateurs de dispersion dans les réseaux de télécommunications longue distance,
- les analyseurs de spectre optique,
- certains lasers à bande étroite,
- les capteurs de stress optiques utilisés pour les ponts, la construction de bâtiments, les ascenseurs, etc.

Du fait de leurs applications actuelles (spectroscopie, réseaux WDM,...) les filtres optiques accordables requièrent des tailles très faibles de quelques centaines de microns, peu de pertes et une large bande de réglage.

En termes de filtres optiques compacts adaptables aux télécommunications, plusieurs systèmes faisant appel à des réseaux de Bragg ont été élaborés : au départ, il s'agissait surtout de structures hors du plan constituées d'alternances de couches de semiconducteurs. Contrairement aux réseaux de Bragg fibrés qui sont inscrits directement dans la fibre, les réseaux microfabriqués offrent beaucoup de flexibilité tout en étant facile à intégrer dans

les réseaux de communication. Plus récemment, malgré les difficultés rencontrées pour la microfabrication de tels microsystèmes, les structures dans le plan ont été investiguées ainsi que l'utilisation de matériaux plus efficaces et pratiques. Tout en permettant d'incorporer différents mécanismes d'actuation, ces systèmes facilitent grandement l'alignement des fibres optiques ce qui est un facteur important pour la réduction des pertes de puissance optique. Cela en fait des candidats idéaux pour le démultiplexage en longueur d'onde ou encore comme sélecteurs de longueur d'onde pour des lasers à large bande. Dans le présent chapitre, les réseaux de Bragg fibrés seront présentés car ils présentent de nombreux avantages et leur utilisation est présentement très répandue voire omniprésente dans les télécommunications ou pour des senseurs, etc. Par la suite, quelques exemples de microsystèmes constitués de réseaux de Bragg hors du plan faits de couches de semiconducteurs sont présentés. La présentation d'exemples de structures microusinées dans le plan permet ensuite de voir l'évolution ayant mené à l'élaboration du dispositif proposé (cf. Tableau A.1 en annexe pour la comparaison des différents types de réseaux de Bragg présentés).

2.1 État de l'art

2.1.1 Les réseaux de Bragg à fibre

Les réseaux de Bragg fibrés sont des composantes dont l'utilisation est largement répandue dans différentes applications optiques [28-31]. Leur capacité de filtrage ainsi que leur facilité d'intégration en font des éléments clé dans des systèmes tels que des lasers à fibre ou des multiplexeurs et démultiplexeurs en longueur d'onde (WDM) par exemple.

Les réseaux de Bragg fibrés sont des réseaux de Bragg inscrits à même la fibre optique utilisée pour transmettre les ondes électromagnétiques (cf. figure 2.1). En effet, il est possible de modifier localement l'indice de réfraction du cœur d'une fibre optique

monomode par absorption optique de lumière ultraviolette [32]. Ainsi, en modifiant cet indice de réfraction de façon permanente et périodique le long de l'axe de la fibre, des réseaux périodiques sont obtenus et des réseaux de Bragg fibrés sont ainsi formés. Tout comme dans les réseaux de Bragg « originaux », la période et la longueur du réseau ainsi que l'ampleur du rapport des indices déterminent l'efficacité de la réflexion ainsi que la largeur de la bande de réflexion. À partir de là, le choix judicieux de ces paramètres permet d'appliquer l'utilisation des réseaux de Bragg fibrés au multiplexage de longueurs d'ondes [31] ou comme des miroirs à bande étroite et de haute réflectivité dans des lasers [29], ou encore comme filtres optiques.

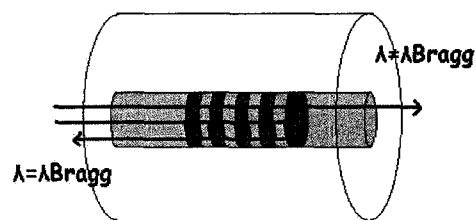


Figure 2.1 Réseau de Bragg inscrit dans le cœur d'une fibre optique

Depuis la découverte de la photosensibilité de la fibre optique, différentes techniques ont été développées afin de fabriquer des réseaux de Bragg fibrés de haute qualité. Ces réseaux à très faibles pertes sont inscrits dans le cœur de façon non invasive à des endroits choisis dans la fibre, offrant une sélectivité en longueur d'onde sur des bandes étroites avec des spécifications bien précises.

Les premières générations de réseaux de Bragg fibrés ont été fabriqués en faisant passer la lumière d'un laser à 488 nm dans le cœur d'une fibre [32]. Les points de plus haute intensité altèrent de façon permanente l'indice de réfraction dans le cœur photosensible et une perturbation d'indice ayant la même période spatiale que le patron

d'interférence formé est obtenue. La longueur sur laquelle s'étend cette perturbation périodique est limitée par la longueur de cohérence de la radiation d'écriture. Le couplage des faisceaux réfléchis amplifie la réflexion, augmentant ainsi l'intensité du patron d'interférence, ce faisant, augmentant aussi l'indice de réfraction aux points de haute intensité. Ce processus se poursuit jusqu'à ce qu'un niveau de saturation soit atteint et que l'indice de réfraction ne varie plus. Ces réseaux sont appelés auto-organisés. Ceux-ci manquent de versatilité du fait que la longueur d'onde de Bragg (longueur d'onde de résonance) est limitée à la longueur d'onde du laser argon (488 nm). Une légère variation de la longueur d'onde de résonance peut être obtenue en appliquant une tension longitudinale lors de l'écriture du réseau de Bragg. De plus, le rapport des indices dans de tels réseaux restant relativement faible, plusieurs périodes sont nécessaires pour une importante réflectivité.

Cependant, beaucoup de développement a été réalisé depuis lors et différentes méthodes de fabrication telles que la technique holographique ou l'écriture par masque de phase, ou encore l'écriture point par point par UV ont été mises au point [33]. La diversification des méthodes de fabrication des réseaux de Bragg fibrés a permis d'en faire des réseaux plus flexibles, ce qui élargit la gamme des applications possibles [34]. De plus, au fil des recherches, leur « accordabilité » a été améliorée grâce à des techniques d'actionnement thermique [35], piézo-électrique [36], ou par compression [37], entre autres.

2.1.2 Les empilements « horizontaux » de diélectriques (hors-plan)

Afin d'apporter une alternative aux limitations des filtres optiques à base de réseaux de Bragg fibrés, différentes sortes de dispositifs intégrables ont été investigués. De nombreux

filtres optiques constitués d'un Fabry Péroth utilisant une cavité entre deux réseaux de Bragg ont ainsi été élaborés.

Les premières générations de ces réseaux de Bragg microfabriqués sont, pour la plupart, constitués d'empilements de différents diélectriques. Ceux-ci constituent des composantes optiques faciles à intégrer, générant peu de pertes et offrant des largeurs de bande étroites ainsi qu'une large gamme de longueurs d'ondes d'ajustement. Cependant, leur fabrication nécessite de multiples dépôts de couches minces sur un substrat afin de « construire » des réseaux de Bragg ayant une forte réflectivité. De plus, ils requièrent un alignement vertical des fibres. Quelques exemples de filtres optiques accordables conçus avec de tels empilements de diélectriques sont présentés ci-après.

Exemple 1 : Filtre optique accordable par effet de levier électrostatique

Dans ce dispositif [12], deux empilements de diélectriques formant des miroirs de Bragg (DBR : Distributed Bragg Reflectors) et séparés par un espace d'air sont utilisés pour constituer un Fabry Péroth (cf. figure 2.2). Le réseau de Bragg du dessus est constitué de 18 paires de diélectrique tandis que celui du dessous en a 21. Ils sont tous deux faits de $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ - $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}$, sont séparés par un espace d'air de $2,7\text{ }\mu\text{m}$ et ils offrent une réflectivité de 99.4 % à la longueur d'onde par rapport à laquelle les épaisseurs ont été déterminées.

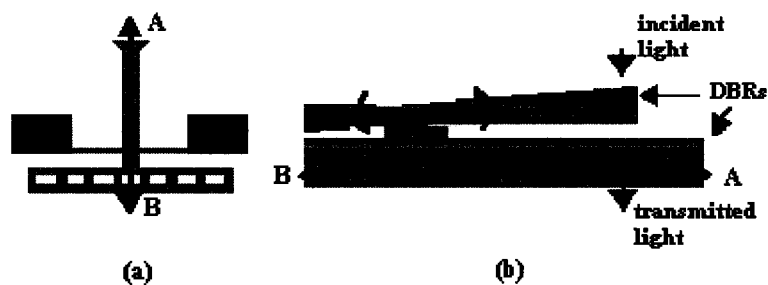


Figure 2.2 Vue de dessus (a) et en coupe (b) du filtre optique accordable (Exemple 1, [12])

Lorsqu'une tension est appliquée entre les deux réseaux, la structure subit une force électrostatique qui l'attire vers le substrat. Étant donné que le centre de masse est situé au niveau du contrepoids, la « tête » du filtre monte alors que le contrepoids descend. Dans cette configuration, la longueur d'onde du filtre augmente avec la tension.

Ce microsystème permet d'éliminer le problème de décharge électrostatique qui peut arriver lorsque le bras micro mécanique est attiré sur le substrat (« pull-in »). La règle des $1/3$ du gap initial comme distance de « pull-in » [38] s'applique aussi à ce filtre optique ; cependant, si une décharge a lieu, elle ne risque pas d'affecter le chemin optique vu que cela va se passer au niveau du contrepoids. De plus, du fait de l'effet de levier utilisé pour mouvoir le filtre, une plage de modulation plus importante peut être atteinte.

Les expériences menées avec ce filtre optique accordable ont démontré une capacité à accorder la longueur d'onde en continu sur un seul mode sur une largeur de bande de plus 100 nm. Néanmoins, les multiples couches dont les réflecteurs de Bragg sont constitués rendent ce filtre difficile à fabriquer car cela requiert un excellent contrôle de la croissance épitaxiale des couches. Par ailleurs, ce dispositif permet d'actionner uniquement la cavité entre les réflecteurs et non les réseaux de Bragg eux-mêmes.

Exemple 2 : Filtre Fabry Perot accordable formé de miroirs de Bragg en InP-air.

Dans les Fabry Perot accordables, la longueur d'onde active est contrôlée en faisant varier la taille de la cavité d'air ce qui permet d'obtenir une plage d'actuation importante et en continu.

Du fait du contraste significatif entre les indices de réfraction de l'air et du InP, des miroirs de Bragg de haute réflectivité peuvent être obtenus avec une alternance de peu de couches quart d'ondes. C'est ainsi que pour les applications en télécommunications visées, il suffit de 2,5 alternances pour atteindre des réflectivités de l'ordre de 99,5%. Cela facilite grandement la fabrication car le contrôle de la croissance épitaxiale est plus efficace comparativement à la fabrication de miroirs en InGaAsP-InP.

La structure proposée [13] est donc telle que représentée sur le schéma de la figure 2.3 suivante :

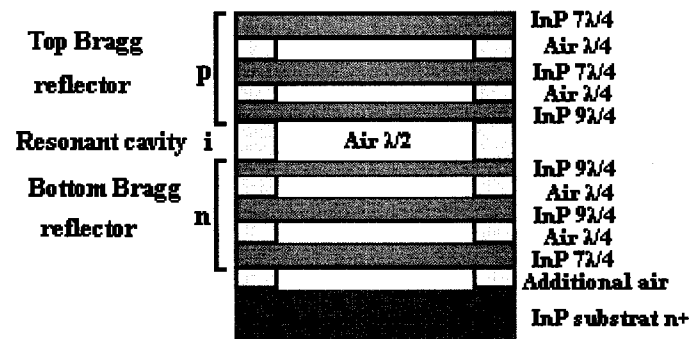


Figure 2.3 Vue en coupe du filtre en InP-air (Exemple 2, [13])

Il s'agit ainsi d'une cavité résonante entre deux miroirs de Bragg constitués d'alternance de couches InP-air. Cette série de couches forme une plate forme qui est suspendue à l'aide deux « bras » latéraux. Le miroir du dessus est dopé p tandis que celui du dessous est dopé n, afin de former une jonction p-i-n. Les couches ont été crues par déposition en phase vapeur à basse pression (LP-MOCVD : low pressure metal-organic chemical vapor deposition) et des couches de InGaAs ont servi de couche sacrificielle pour les gaps d'air. Une telle structure a permis d'obtenir une résonance à 1566 nm avec une largeur à la moitié du pic (FWHM : full width at half maximum) de 0,6 nm. La longueur d'onde a pu être contrôlée sur une largeur de 62 nm en appliquant une tension de 14 V à travers la cavité d'air. Cependant, la plage de contrôle en longueur d'onde est limitée par la courbure de la structure car celle-ci fait augmenter la largeur du pic de résonance. Cette courbure provient de l'actuation du fait de la force électrostatique appliquée mais aussi du stress résiduel dans les couches de InP.

Exemple 3 : Filtre optique accordable en couches de silicium et oxyde de silicium modulé thermiquement

La structure proposée [14] se veut robuste, industriellement viable et utilise une modulation thermique pour atteindre une large bande d'ajustement de la longueur d'onde. Il s'agit d'un résonateur microfabriqué très fin, combiné avec une structure de suspension microusinée

pour obtenir un filtre optique très compact à haute performance qui allie flexibilité et faiblesse de consommation en énergie.

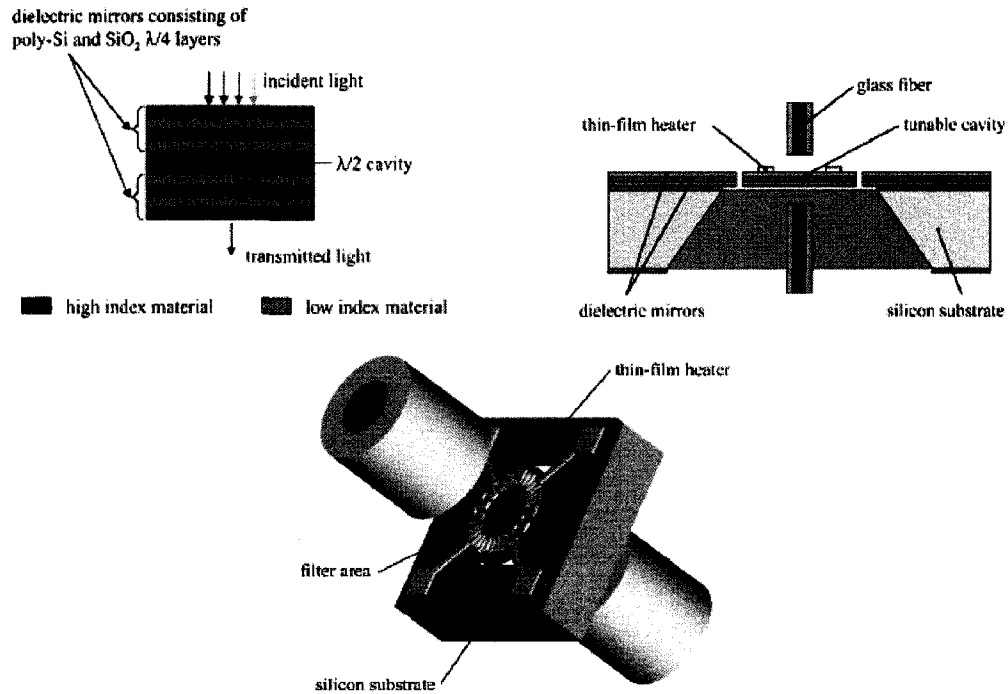


Figure 2.4 Vues en coupe et en 3D du filtre en Si et SiO_2 actionné thermiquement (Exemple 3, [14])

Les variations de température dans la structure changent non seulement l'épaisseur physique des couches mais aussi les indices de réfraction de la cavité et des miroirs par effet thermo-optique. En effet, les miroirs de Bragg sont faits de silicium polycristallin et le polysilicium est un matériau ayant un coefficient thermo-optique élevé d'où le choix de ce matériau pour la structure présentée.

Le microsystème a été fabriqué en déposant les couches du filtre sur un substrat de silicium puis en les structurant. Une couche mince a été déposée par-dessus les couches de la structure afin de procéder au chauffage des couches du filtre et une résistance additionnelle a été intégrée à la couche chauffante afin de mesurer la température et ainsi mieux la contrôler.

En chauffant les couches du filtre, l'épaisseur optique de la cavité est augmentée du fait de l'augmentation de l'indice de réfraction; il en résulte un déplacement du pic de transmission vers les longueurs d'onde plus élevées au fur et à mesure que la température augmente. Une largeur de bande de 2,73 nm ainsi que une bande d'ajustement de 5,3 nm, avec une différence de température de 85 K, ont pu être mesurées.

Ce dispositif utilise des couches plus maniables et largement utilisées en microfabrication ce qui facilite grandement sa fabrication. Néanmoins, la microstructure est desservie par la nécessité d'avoir une membrane chauffante relativement large pour avoir une bonne uniformité de température; de plus, une certaine faiblesse est dénotée dans les vitesses d'ajustement (environ 30 ms pour une membrane de 250 μm).

Exemple 4 : Filtre en silicium et oxyde de silicium actionné par électrostatique

Le microsystème [15] est composé de deux empilements de lames quart d'onde faits de couches alternées de Si et de SiO_2 et séparés par une cavité d'air ajustable (cf. figure 2.5). La période de l'empilement de diélectrique a été choisie de façon à obtenir une bande interdite aux longueurs d'onde utilisées en télécommunication soit 1,3 et 1,55 μm .

Cross Sectional View

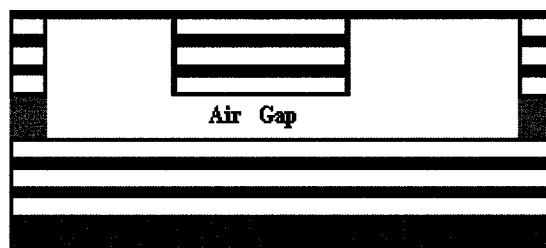


Figure 2.5 Vue en coupe du filtre en Si et SiO_2 actionné par électrostatique (Exemple 4, [15])

Lors de la fabrication, le SiO_2 est déposé par dépôt en phase vapeur assisté par plasma (PECVD : plasma enhanced chemical vapor deposition) et le Si est déposé à l'aide d'un faisceau d'électrons (e-beam). Une couche sacrificielle de polyimide permet de définir le

gap d'air et une couche mince d'un matériau de faible module d'Young est déposée par-dessus l'empilement de diélectrique du dessus afin de servir de membrane de support. La structure est ensuite définie par photolithographie. L'application d'une tension entre la membrane et le substrat fait varier la dimension de la cavité par effet de plaques parallèles. À incidence normale, cette structure exhibe une large bande interdite de $1\ \mu\text{m}$, ce qui résulte en des modes de résonances largement espacés dont un à $1,3$ et un autre à $1,55\ \mu\text{m}$. L'ajustement à faible voltage de ces modes résonants a permis de les déplacer de $60\ \text{nm}$ pour une tension appliquée de $10\ \text{V}$.

Malgré une fabrication grandement simplifiée par la nature des couches minces de ce filtre, ce dernier présente, encore une fois, le désavantage d'actionner uniquement la cavité entre les réseaux et non les réseaux eux-mêmes. De plus, l'alignement vertical de la fibre augmente les risques de pertes d'insertion et la présence de la membrane de support entre la fibre et les réflecteurs peut avoir un impact sur la réponse spectrale du filtre.

2.1.3 Les réseaux de Bragg « verticaux » (dans le plan)

En plaçant entre deux fibres un filtre basé sur un Fabry Péroth dont les miroirs sont des réseaux de Bragg et la cavité résonante fait la moitié de la longueur d'onde de transmission, il est possible d'obtenir une large bande de réflexion et une bande passante étroite. Plusieurs systèmes de ce type ont été constitués avec des empilements de couches diélectriques mais leur conditionnement n'est pas trivial et la difficulté d'alignement constitue aussi une limitation de leur potentiel d'intégration.

L'utilisation du silicium et de l'air comme couches du réflecteur permet de n'avoir besoin que de 2 à 3 périodes pour les réflecteurs de Bragg, d'où une compacité améliorée tout en réduisant les pertes. Afin, entre autres, de faciliter l'alignement des fibres optiques avec les filtres, de nouveaux design de filtres optiques accordables ont ainsi été développés. Ceux-ci sont fabriqués dans le plan du substrat de silicium en combinant différentes techniques de microusinage en volume. Ces filtres sont aussi composés de réseaux de Bragg mais les

principes de fonctionnement et d'actuation varient beaucoup. Deux exemples de cette nouvelle génération de filtre en développement sont présentés ci-après.

Exemple 5 : Filtre optique accordable en longueur d'onde par effet thermo optique dans le silicium cristallin

Un filtre optique accordable a été microfabriqué dans du silicium cristallin afin d'utiliser la modulation thermique du chemin optique pour assurer l'actuation du microsystème [17] (cf. figure 2.6). Celui-ci comporte un étalon Fabry Péroth formé entre 2 réseaux de Bragg de haute réflectivité composés d'une alternance de murs de silicium et d'espacements d'air.

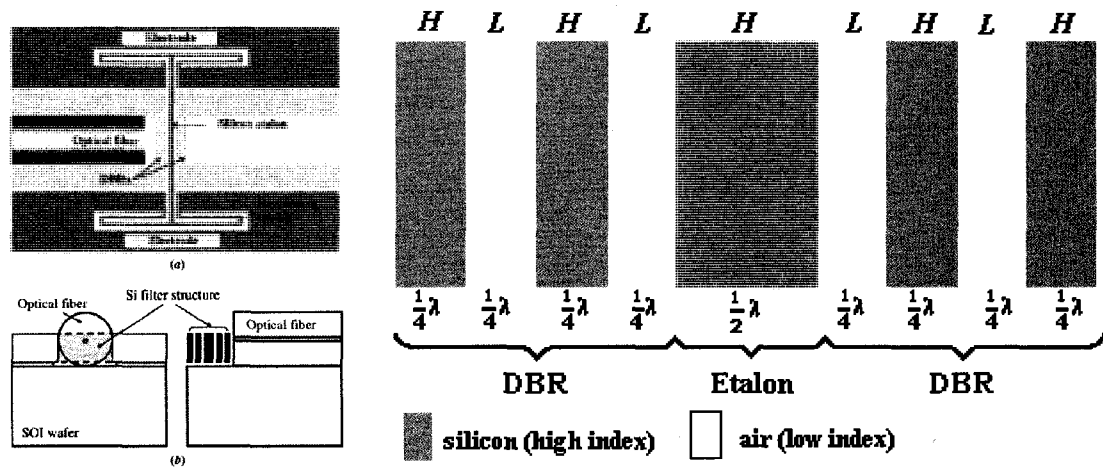


Figure 2.6 Vues de dessus et en coupe du filtre en Si et SiO₂ actionné thermiquement (Exemple 5, [17]); schéma des couches du dispositif.

L'étalon Fabry Péroth est la seule partie mobile du système et il est soutenu par des ressorts. Le chemin optique de l'étalon central est modulé thermiquement en utilisant un effet thermo-optique dans le silicium. Ceci permet de faire varier la longueur d'onde centrale de la bande de réflexion ou de la bande de transmission. Pour ce faire, une tension est appliquée sur les électrodes (voir figure 2.6 a) : le courant circulant à travers l'étalon et les ressorts élève la température de l'étalon par effet Joule ce qui provoque la modification de chemin optique et donc l'ajustement en longueur d'onde. Les réseaux de Bragg quant à eux sont peu ou pas affectés par l'élévation de température grâce à l'isolation apportée par l'espacement d'air. Un tel filtre est fabriqué par gravure profonde du silicium par plasma

(DRIE ICP) suivie d'une oxydation des surfaces et d'une gravure oxyde afin de réduire au maximum la rugosité des miroirs et en faire des miroirs aussi peu dispersifs que possible. L'alignement avec la fibre se fait de façon horizontale ce qui est un avantage non négligeable car le gain en temps d'alignement et en réduction des pertes de puissance est substantiel.

Lorsqu'une tension de 25 V est appliquée, la longueur d'onde centrale est déplacée de 9 nm avec une sensibilité moyenne d'actuation de 0.9 nm/K ce qui correspond à 10.2 nm/W. et la température maximale atteinte avec de telles structures est de 392 K.

Ce filtre est limité par la vitesse réduite de l'actionnement thermique comparativement à un actionnement électrostatique par exemple. Par ailleurs, l'actionnement se fait au niveau de la cavité et non des réflecteurs de Bragg, et l'absence de variation de la réponse spectrale par effet thermo-optique sur les réflecteurs n'a pas été confirmé

Exemple 6 : Filtre en Si/Air accordable électrostatiquement

Un design dans le plan avec les structures gravées dans le substrat et les fibres incorporées dans le plan facilite l'intégration du composant optique dans un réseau. Pour qu'un tel microsystème ait de bonnes performances optiques, les murs de silicium doivent être parfaitement verticaux, avoir des dimensions très précises ainsi que des surfaces optiquement lisses de rugosité RMS (root mean square) inférieure à 30 nm [39] afin de réduire les pertes.

La figure 2.7 suivante montre la microstructure proposée [18] : une alternance de murs de silicium et de gaps d'air d'épaisseur correspondant à un quart de longueur d'onde (ou un multiple entier impair) où la longueur d'onde en question est la longueur d'onde centrale de la bande de transmission. Quant à la cavité entre les deux réseaux de Bragg, elle correspond

à la moitié de cette longueur d'onde ou un multiple entier de la moitié.

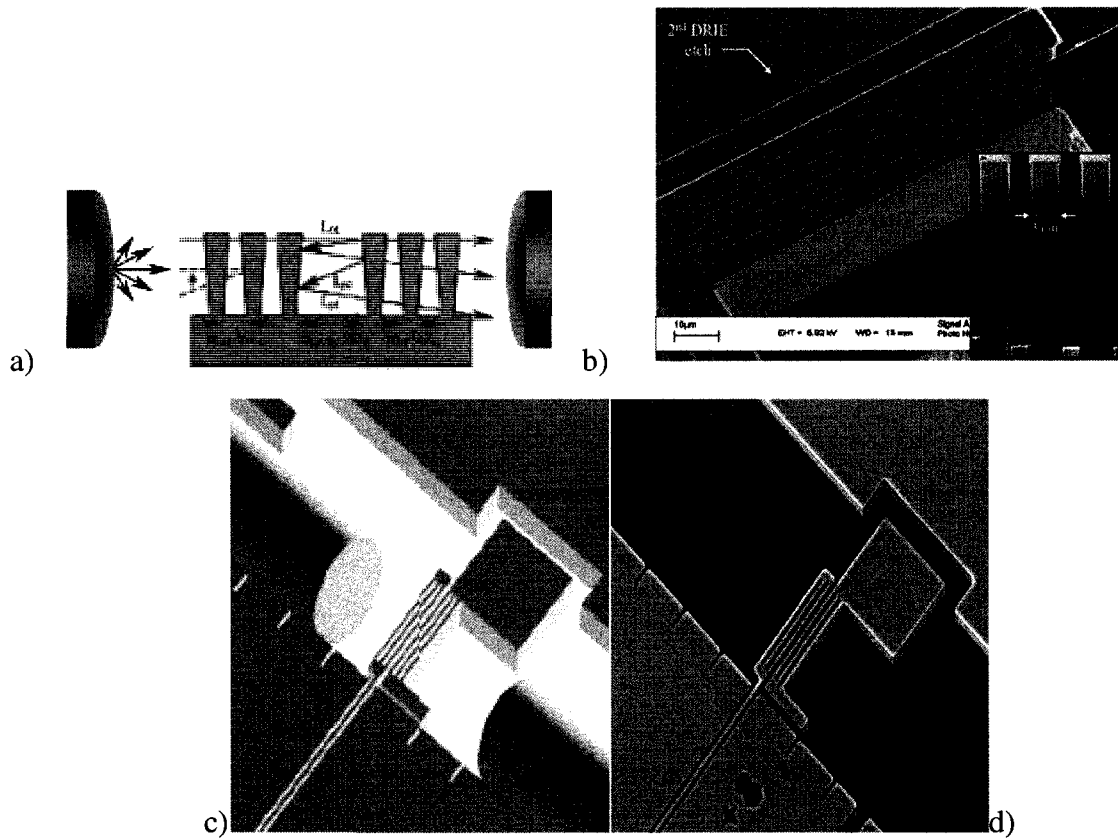


Figure 2.7 a) Schéma en coupe du principe de filtrage du dispositif; Images SEM (b et d) et 3D (c) de la microstructure (exemple 6, [18])

La fabrication de cette structure est réalisée par gravure profonde DRIE (Deep Reactive Ion Etch) dans le silicium, suivi d'une brève immersion dans du KOH. Cette gravure liquide anisotrope permet de lisser les parois gravées par DRIE en exposant préférentiellement les plans $\langle 111 \rangle$ du cristal. Cette méthode nécessite que le substrat soit du silicium (110) et que la photolithographie pour définir les motifs soit effectuée en alignant les tranchées de silicium avec le méplat à $\langle 111 \rangle$. La première gravure DRIE définit les murs de silicium tandis que la deuxième permet de creuser les tranchées dans lesquelles les fibres optiques doivent être guidées vers la structure (cf. figure 2.7 b).

L'actionnement se fait par le biais de peignes électrostatiques qui font se mouvoir l'un des miroirs de Bragg constitués de 3 murs de silicium avec des espacements d'air.

Ce microsystème cause des pertes d'insertion de 11dB mais la bande passante est plutôt étroite à 0,65 nm. Néanmoins, un léger déplacement de 700 GHz dans la longueur d'onde de transmission a été mesuré. Celui-ci est attribuable à la perte de silicium lors de la microfabrication et correspondrait à une surgravure d'environ 26 nm dans les murs de silicium.

Malheureusement, l'actionnement de cette structure se fait encore au niveau de la cavité et la conception du système d'actionneur cause une courbure du réflecteur de Bragg mobile et gâche la réponse spectrale de Bragg du filtre.

2.2 Réflecteurs de Bragg en silicium actionnés individuellement

Le concept proposé se veut très innovateur à plusieurs points de vue. Tout comme la plupart des filtres optiques accordables récemment en cours de développement, cette structure a été conçue pour être ultra compacte, parfaitement contrôlable et facile à fabriquer à grande échelle; de plus, elle se veut accordable de manière précise et rapide et devrait permettre une plus large plage de longueurs d'onde d'actuation.

Pour ce faire, le microsystème optique proposé est constitué de murs de silicium verticaux séparés par des espacements d'air tels qu'une alternance périodique de couches d'indices de réfractions différents causant une réflexion de Bragg est obtenue.

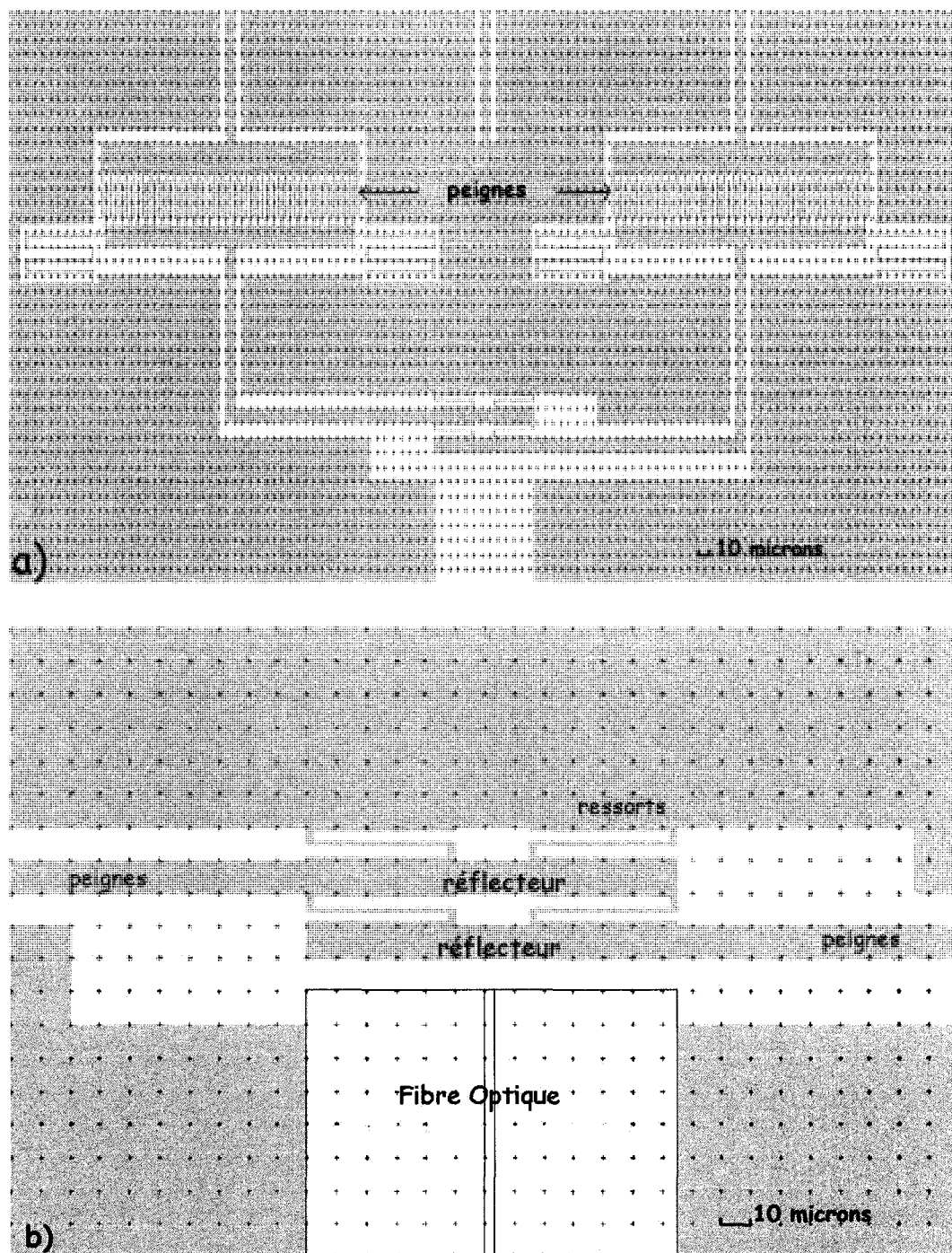


Figure 2.8 Schéma du dispositif proposé : a) vue générale; b) zoom sur les réflecteurs

NOTA : la taille du cœur de la fibre n'est pas à l'échelle sur les figures 2.7 et 2.8.

Les murs de silicium sont individuellement déplaçables par le biais de peignes électrostatiques interdigités [20] (cf. figure 2.8).

Une fois microfabriqués, les murs de silicium sont suspendus dans le vide et maintenus au substrat par des ressorts. D'autres ressorts maintiennent la partie mobile des peignes en suspension (cf. figure 2.9). Quant aux peignes fixes, ils sont isolés du reste du substrat par une tranchée d'air qui fait le tour du peigne mobile et de son contact. Cela permet d'appliquer une différence de potentiel entre les deux parties du peigne électrostatique.

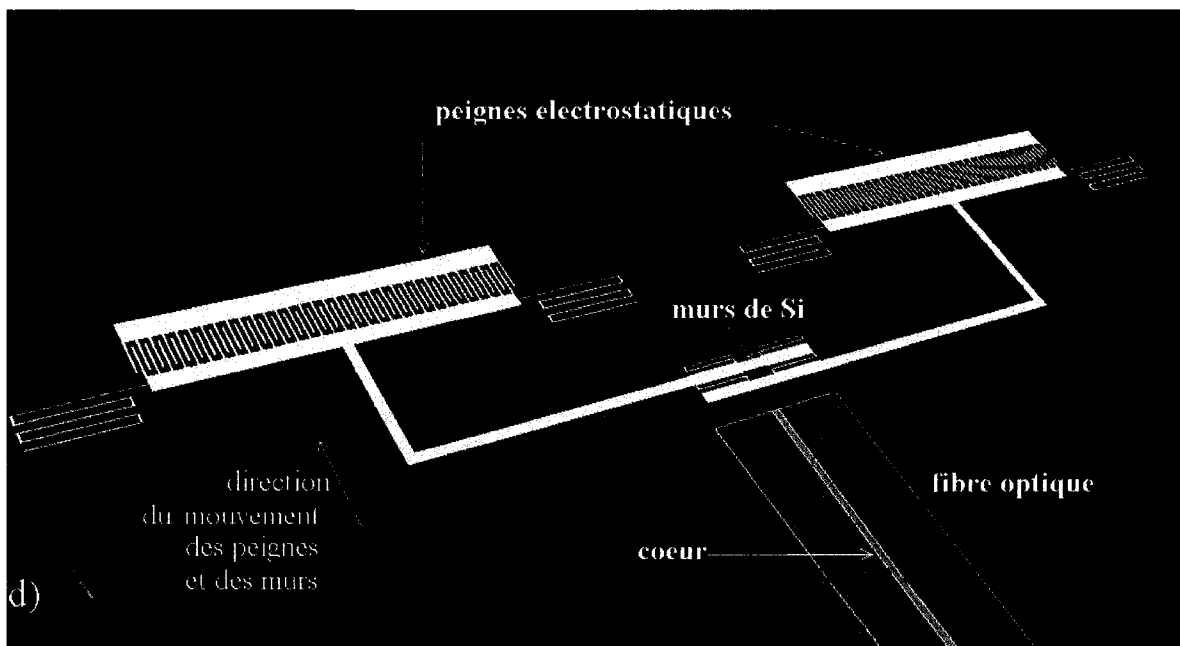


Figure 2.9 Modèle en 3 dimensions du dispositif avec une fibre optique alignée

Le choix du silicium comme matériau pour la fabrication des réflecteurs de Bragg comporte une multitude d'avantages. En effet, le rapport des indices de réfraction du silicium et de l'air est élevé (3,5) ce qui fait qu'il faut très peu de périodes du réseau (aussi peu que 2 ou 3) pour obtenir une grande réflectivité. Cela permet donc de réduire la taille du réseau et par le fait même d'améliorer la compacité du dispositif. Par ailleurs, en plus du fait qu'il soit un matériau peu coûteux, les méthodes de microusinage du silicium sont largement

développées et la microfabrication avec ce support offre plus de flexibilité que les couches de semi-conducteurs crues par croissance épitaxiale telles que le InGaAs ou le InP.

La disposition du filtre permet un alignement horizontal de la fibre. Celle-ci est « amenée » au filtre par le biais de tranchées dans le silicium : les tranchées servent ainsi de guides pour la fibre optique qui est alors maintenue en place juste en face des murs de silicium (cf. figure 2.9). Cela rend l'alignement plus aisé et plus précis, réduisant ainsi au maximum les pertes de puissance optique.

Le contrôle individuel, par peignes électrostatiques interdigités, de chacun des murs de silicium constituant le réseau de Bragg offre une plus grande flexibilité au filtre tout en permettant un actionnement rapide et fiable.

Par ailleurs, dépendamment de l'application visée, il suffit de modifier les dimensions initiales du réseau afin de sélectionner des ordres de réflexion élevés pour des bandes étroites ou des ordres de réflexion faibles pour des bandes larges.

À partir de la structure développée, des cavités de Fabry Péro, dont non seulement la cavité résonante mais aussi les miroirs seront ajustables, peuvent être constitués.

Le cahier des charges défini au début de ce projet consistait à mettre au point et à optimiser un procédé de fabrication visant à fabriquer ce dispositif de sorte que :

- la rugosité des murs soit inférieure à 20 nm RMS [39],
- les murs réflecteurs soient individuellement actionnés par les peignes électrostatiques,
- l'alignement de la fibre optique se fasse dans le plan du filtre,
- la réflectivité du filtre soit maximale à la longueur d'onde centrale $\lambda=1550$ nm.

CHAPITRE 3 Fabrication

En microélectronique, dans l'industrie des semiconducteurs et même dans la fabrication de MEMS, les procédés de microfabrication comportent souvent plusieurs dizaines d'étapes et un nombre important de niveaux de masques. Au cours de ce projet, trois différentes méthodes de fabrication ont été investiguées afin de mettre au point les dispositifs d'une manière simple, impliquant aussi peu d'étapes que possible, tout en étant reproductible, et de préférence à grande échelle. Ces procédés sont décrits ci-après et les différentes étapes qui les constituent seront étudiées en détail afin d'apporter une meilleure compréhension de leur principe et de leur processus d'optimisation.

3.1 Présentation des méthodes de fabrication

Les trois méthodes utilisent au départ une gaufre « silicon on insulator » (SOI) constituée d'une couche de silicium où sont fabriqués les microsystèmes (« device layer »), d'une couche sacrificielle d'oxyde de silicium (« buried oxide »), et d'un substrat massif de silicium (« handle layer »). Dans les deux premières méthodes, la couche du dispositif a une épaisseur de 10 μm tandis que dans la troisième méthode elle est de 70 μm . Il faut noter que le choix de ce type de support permet de réduire le nombre d'étapes. À l'origine, le concept des gaufres de silicium sur isolant s'est développé du fait qu'en isolant la couche supérieure où étaient microfabriqués les circuits du reste de la gaufre, il devenait possible de faire des circuits plus rapides et consommant moins de puissance. Différentes méthodes ont été développées pour la fabrication mais la plus répandue repose sur le collage d'une gaufre de silicium oxydée thermiquement avec une autre gaufre de silicium qui sera amincie pour atteindre l'épaisseur de la couche supérieure désirée. Dans le cadre de la fabrication des MEMS, les SOI sont utiles autant pour la rapidité des circuits que pour le fait qu'elles offrent une couche sacrificielle pour la mise en place de structures suspendues faites de silicium monocristallin, ce qui leur confère d'excellentes qualités mécaniques.

3.1.1 Méthode 1 : Masque de chrome pour la gravure DRIE sur SOI

10 μm

La première méthode, initiée lors d'un projet de fin d'études, consistait à déposer une couche de chrome d'une vingtaine de nanomètres (cf. figure 3.1 b) sur un substrat de silicium SOI (silicium sur isolant) (cf. figure 3.1 a). Il s'agissait ensuite de graver ce masque métallique à l'aide d'un faisceau d'ions focalisé selon la structure voulue (cf. figure 3.1 c) puis de procéder à la gravure profonde par plasma (DRIE ICP) du silicium sur les 10 μm d'épaisseur de la couche supérieure (« device layer ») du substrat SOI (cf. figure 3.1 d). Des étapes subséquentes de photolithographie par alignement auraient permis de définir les tranchées pour les fibres optiques dans la couche d'oxyde (cf. figure 3.1 e) puis dans le substrat (cf. figure 3.1 f). Après cela, les contacts électriques devaient être fabriqués par la méthode dite du « lift-off ». Cette méthode consiste à prédéfinir par lithographie les motifs des contacts sur la gaufre (cf. figure 3.1 g) et ensuite de procéder au dépôt de chrome par-dessus la résine (cf. Figure 3.1 h). Lorsque la résine est enlevée, il ne reste du métal qu'aux endroits voulus (cf. Figure 3.1 i). Pour finir, il s'agissait de procéder à la libération des

structures par gravure de l'oxyde en dessous des structures mobiles (cf. figure 3.1 j).



Figure 3.1 Étapes de la méthode de fabrication #1

3.1.2 Méthode 2 : Masque de résine pour la gravure DRIE sur SOI 10 µm

Dans ce procédé, les contacts électriques sont définis en premier par lift-off. La première étape de photolithographie est donc effectuée (cf. Figure 3.2 b) sur une gaufre SOI (cf. Figure 3.2 a), puis le dépôt d'or par évaporation est fait par-dessus (cf. Figure 3.2 c). Par la suite, en enlevant la résine, la couche d'or n'est conservée que sur les zones prédéfinies pour la fabrication des contacts (cf. Figure 3.2 d). Ensuite, les motifs des structures sont définis dans la couche supérieure de silicium d'un substrat SOI par photolithographie (cf. Figure 3.2 e) et un masque mince de photorésine est utilisé lors de la gravure profonde par plasma. Une fois les 10 µm de silicium gravés (cf. Figure 3.2 f), des étapes subséquentes de photolithographie sont envisagées pour creuser les tranchées dans lesquelles seront insérées la fibre optique. Pour ce faire, un masque de résine épaisse couvrant autant que possible les

topologies sera lithographié par alignement avec le masque précédent (cf. Figure 3.2 g), avant de procéder à une gravure d'oxyde (cf. Figure 3.2 h), suivie d'une gravure DRIE du silicium (cf. Figure 3.2 i) et du décapage de la photorésine épaisse (cf Figure 3.2 j). Pour finir, la libération des structures se fait de manière similaire à la méthode précédente en gravant l'oxyde en dessous des structures mobiles (cf. Figure 3.2 k).



Figure 3.2 Étapes de la méthode de fabrication #2

3.1.3 Méthode 3 : Masque de résine pour la gravure DRIE sur SOI 70 µm

Afin de réduire considérablement le nombre d'étapes du procédé, cette méthode définit d'abord les contacts électriques par photolithographie lift-off (cf. Figure 3.3 a : substrat de départ, 3.3 b : définition des motifs dans la résine, 3.3 c : dépôt d'or et 3.3 d : retrait de la résine), puis une seconde lithographie avec une résine épaisse (cf. Figure 3.3 e) permet de graver en une seule étape la couche supérieure de silicium d'un substrat SOI, fabriquant ainsi en une seule fois les structures mais aussi les tranchées pour la fibre optique (cf. Figure 3.3 f). La libération peut ensuite être effectuée (cf. Figure 3.3 g).

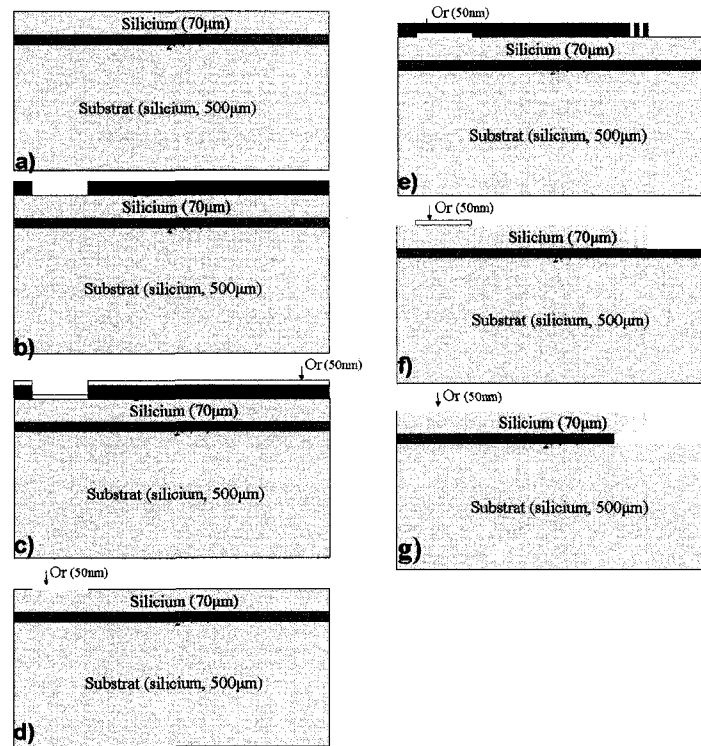


Figure 3.3 Étapes de la méthode de fabrication #3

3.2 Développement de la méthode 1

Avant de commencer un quelconque procédé sur les gaufres, il est important de s'assurer de leur propreté. Aussi, une étape de nettoyage est toujours réalisée en début du procédé. Celle-ci consiste à faire un bain de 10 minutes dans une solution de Piranha aussi appelé acide de Caro [40]. Cette solution est composée de 2 volumes d'acide sulfurique (H_2SO_4) pour 1 volume d'eau oxygénée (H_2O_2) et doit être manipulée avec précaution car la réaction qui a lieu est très exothermique. Elle permet d'enlever de la surface du silicium toute trace de résidus organiques (graisse, résine, ...). La gaufre est ensuite rincée soigneusement à l'eau déionisée puis mise à déshydrater dans un four à $120^\circ C$ en attendant d'être utilisée.

3.2.1 Gravure par faisceau d'ions focalisé

Afin de définir les motifs dans le masque de chrome déposé sur le substrat SOI, la gravure par faisceau d'ions focalisés a été investiguée. La gravure par faisceau d'ions focalisé est une technique de gravure sèche directionnelle permettant d'imprimer des motifs submicroniques dans des types de substrats très variés. Cette technique utilise des ions de gallium qui sont accélérés vers la surface afin d'arracher les atomes aux endroits spécifiés pour définir les motifs. Des bobines de déflexions magnétiques permettent de balayer la surface avec le faisceau d'ions et le parcours de ce dernier peut ainsi être contrôlé avec précision. En augmentant le courant du faisceau, la surface est bombardée avec plus d'énergie et on grave ainsi de plus en plus fort. Par ailleurs, de faibles courants permettent d'affecter très peu la surface tout en émettant des électrons secondaires qui vont être captés par le détecteur et ainsi procurer une image.

Le système utilisé au laboratoire de microfabrication est un Dual Beam Strata 400 de la compagnie FEI™. Cet appareil combine un système de faisceau d'ions focalisés avec un microscope électronique à balayage ce qui permet de prendre des images par faisceau électronique afin de vérifier l'état d'avancement de la gravure, sans pour autant continuer à attaquer la surface.

Cette technique a été utilisée avec succès afin de graver dans le masque de chrome des tranchées de 25 μm de long pour une largeur d'environ 200nm (cf. Figure 3.4 a : vue générale; b : zoom in). Afin d'obtenir des temps de gravure acceptables pour une

épaisseur de chrome d'une cinquantaine de nm, il a fallu utiliser des courants de 3000 pA.

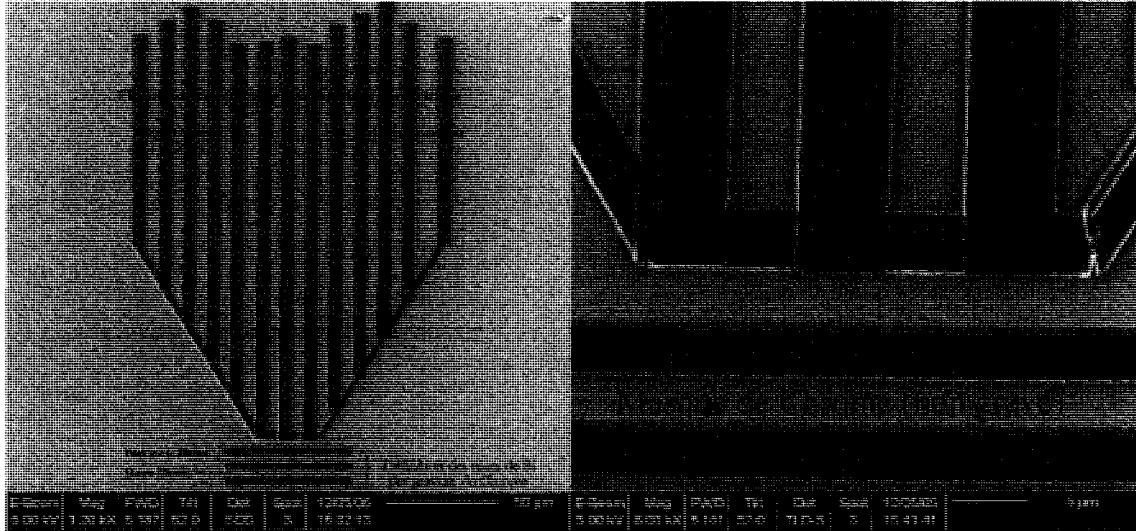


Figure 3.4 Masque gravé dans le chrome par faisceau d'ions focalisé

Sur la Figure 3.4, les structures montrées constituent une ébauche de masque pour la fabrication de murs de silicium fixes avec une tranchée permettant d'amener la fibre optique devant le filtre ainsi fabriqué. Ces structures sont gravées dans le chrome et la surface dans le fond des ouvertures est celle du substrat de silicium.

Malgré la possibilité de faire des motifs très petits gravés avec précision ainsi que la possibilité d'un masque à la sélectivité quasi infinie [41] dans une gravure profonde réactive par plasma du silicium, la structuration par faisceau d'ions pose un certain nombre de problèmes. Tout d'abord, la limitation à des motifs submicroniques constitue une contrainte importante car l'écriture de grandes surfaces dans le masque de chrome prend un temps très long. En effet, pour obtenir des spectres de réflexion plus étroits, il est nécessaire d'avoir des ordres de réflexion plus élevés d'où des murs de silicium et des espacements d'air plus épais. Il faut alors composer avec des temps de gravure de masque élevés et/ou des étapes supplémentaires de lithographie dédiées aux grandes surfaces que requiert la fabrication de ces murs. De plus, la gravure du chrome par faisceau d'ions cause la repulvérisation de particules qui produisent un effet de micromasquage lors de l'étape

subséquente de gravure profonde DRIE. En effet, quelques particules de chrome arrachées à la surface peuvent rester collées dans le fond des motifs et vu la sélectivité de la gravure du silicium par rapport au chrome, ces particules aussi petites soient-elles empêchent la gravure. Il se forme alors dans les tranchées une multitude de pics de silicium appelés « grass » (cf. Figure 3.5). Il a donc fallu renoncer à faire le masque de chrome par faisceau d'ions focalisés et s'orienter vers la structuration par photolithographie conventionnelle et gravure profonde.

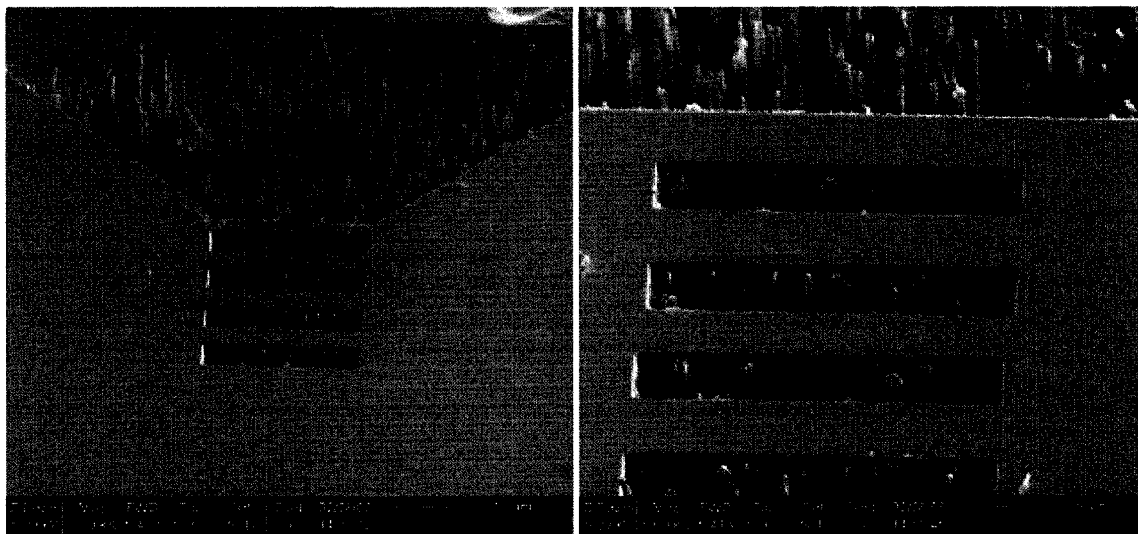


Figure 3.5 Pics produits à la gravure DRIE par le micromasquage des particules de chrome (« grass »)

Ce changement de procédé a un impact direct sur les propriétés du filtre. En effet, les dimensions correspondant à de faibles ordres de réflexion (388 nm d'espacement d'air pour l'ordre 1 par exemple) ne peuvent être résolues par photolithographie conventionnelle. Les dimensions du filtre ont donc été augmentées, et une réponse spectrale du filtre avec plusieurs bandes étroites de réflexion est attendue (cf. figure 1.6).

3.3 Développement des méthodes 2 et 3

3.3.1 Photolithographie

La photolithographie est une méthode de reproduction d'un motif sur une surface. Son principe est très simple : une couche de résine photosensible est uniformément appliquée sur la surface où les motifs doivent être définis. La photorésine est ensuite exposée à des rayons ultraviolets à travers un masque de verre ayant du chrome à certains endroits. Dépendamment du type de résine, les parties exposées (absence de chrome sur le masque) sont rendues solubles (résine positive) ou insolubles (résine négative). Ainsi, après l'exposition, le développement permet de faire partir la résine soluble, exposant alors les endroits de la surface sur lesquels une gravure ou un dépôt doivent être effectués selon un patron bien précis, défini par le masque. Aussi, afin de procéder à la lithographie, un masque a dû être préparé. Ce dernier est un masque de 5 pouces, en verre avec une très fine couche de chrome qui a été structurée par écriture par faisceau d'électrons avec une résolution n'excédant pas $1,5\ \mu\text{m}$. À partir de ce masque, la photolithographie avec de la résine positive SP1813 a été effectuée en adaptant les paramètres disponibles au laboratoire de microfabrication (la fiche signalétique de la résine est jointe en annexe).

3.3.1.1 Photomasque

Le premier masque qui a été élaboré pour ce projet comportait une série de structures fixes avec des murs de différentes tailles, des structures mobiles pour des tests de mouvements par application d'une force mécanique, ainsi que différents prototypes de structures actionnées par des peignes interdigités électrostatiques (cf. Figure 3.6). Par ailleurs, par souci d'économie et de simplicité, deux niveaux de masque ont été faits sur le même support. En effet, la moitié supérieure du masque a été consacrée aux structures tandis que les motifs pour la réalisation des contacts se sont retrouvés sur l'autre moitié.

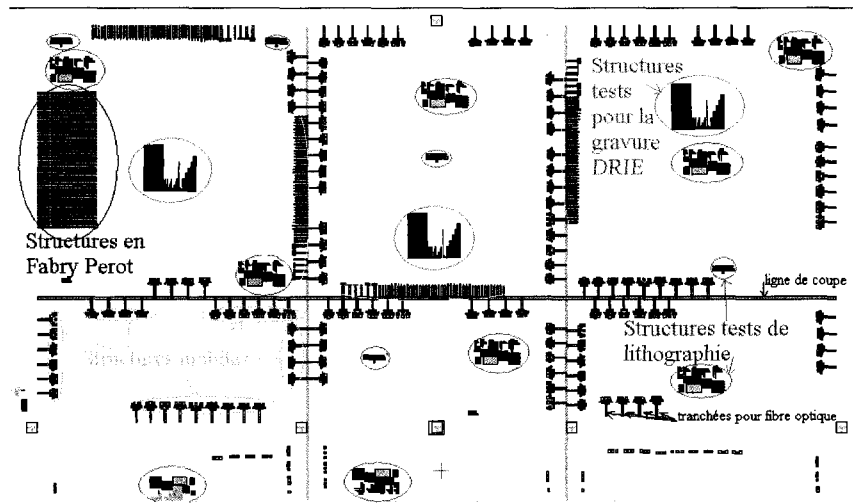


Figure 3.6 Masque 1 : moitié supérieure avec structures

De plus, sur les deux moitiés de masques, des motifs tests de lithographie et de gravure ont été ajoutés, afin de vérifier après chaque étape la qualité des résultats obtenus. Le fonctionnement de ceux-ci est expliqué dans le paragraphe qui suit.

Les motifs tests de lithographie sont constitués de neuf séries de tranchées et murs horizontaux et verticaux d'une largeur allant de $1\mu\text{m}$ à $5\mu\text{m}$ avec des intervalles entre les tailles des séries de $0,5\mu\text{m}$ (cf. Figure 3.7). La dimension des motifs de chacune des séries est indiquée par un numéro placé au dessus. Cette dimension correspond aussi à la largeur de l'espacement entre les lignes. Les motifs en champ clair représentent les tranchées tandis que ceux en champ foncé correspondent à des murs. Suite au développement de la photorésine, l'observation de ces motifs au microscope permet de se faire une idée de la qualité de la photolithographie réalisée. Ainsi, la plus petite série de motifs qui ressortent parfaitement bien correspond environ à la résolution obtenue.

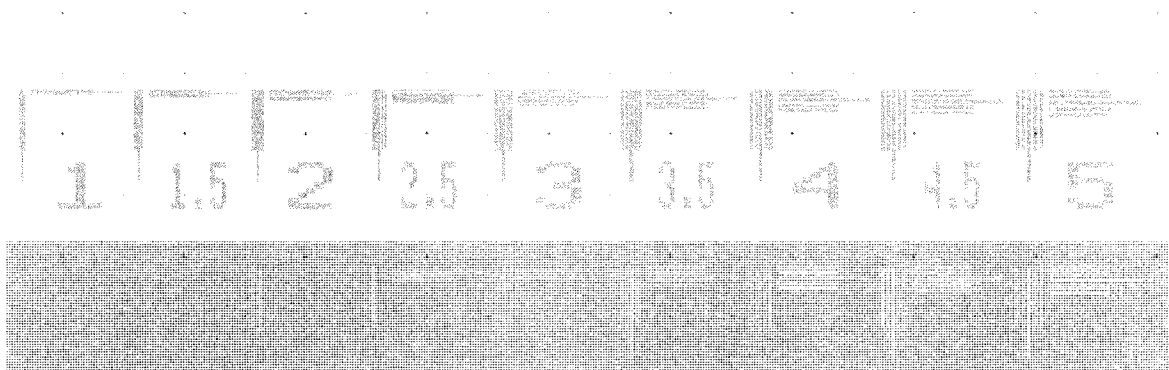
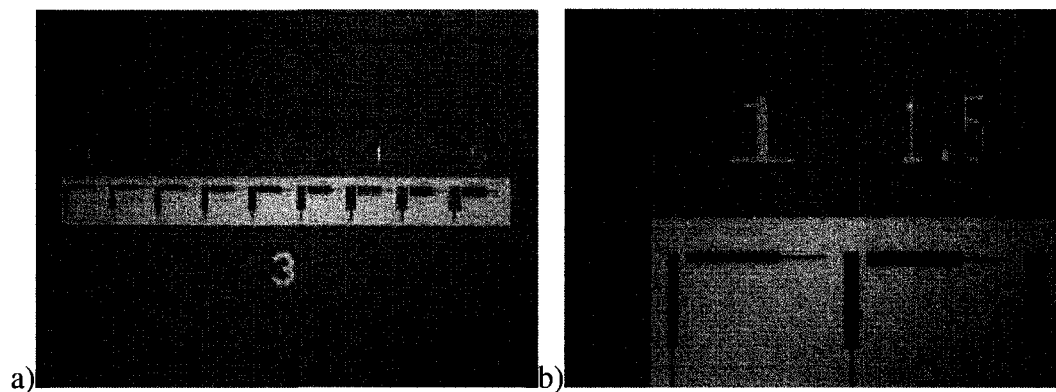


Figure 3.7 Motifs test de photolithographie

Sur le masque fabriqué, ces motifs ont été uniformément répartis afin d'évaluer la qualité de la photolithographie à différents endroits de la gaufre. Dans notre cas, il était important que les motifs de 1,5 μm soient parfaitement résolus pour que les motifs des structures soient de bonne qualité (cf. figure 3.8). Par ailleurs, l'observation de l'allure des extrémités des structures a permis d'optimiser les paramètres de lithographie. En effet, les résultats d'une éventuelle surexposition ou d'un sous-développement par exemple se reflétaient à ces endroits par des extrémités excessivement arrondies ou des résidus de résine.



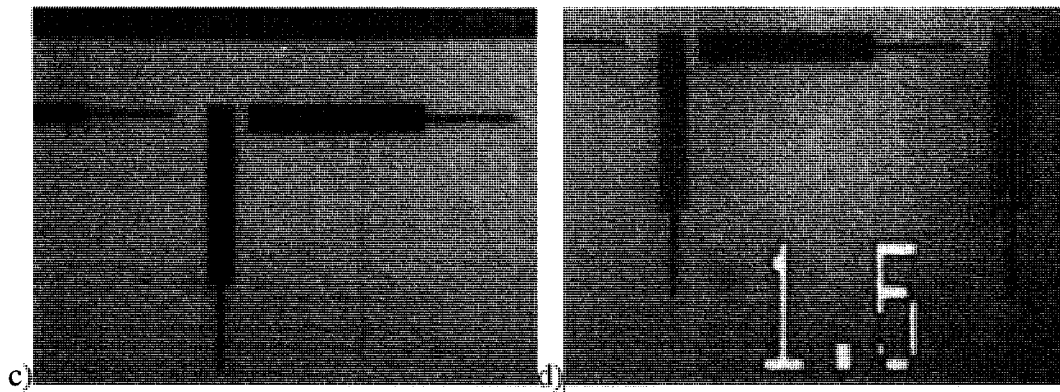


Figure 3.8 Motifs tests de lithographie réalisés dans la résine

D'autre part, des motifs tests pour la gravure ont été élaborés lors de la fabrication de ce masque (cf. Figure 3.9). Ceux-ci ont été introduits afin de vérifier la verticalité des parois gravées mais aussi pour vérifier le taux de gravure. En effet, en gravure DRIE, le taux de gravure est grandement affecté par une série de facteurs dont la largeur des tranchées et leur espacement. C'est ainsi que les plus petites tranchées sont gravées moins rapidement que les grosses et qu'une série de tranchées de la même taille seront gravées différemment d'une petite tranchée à côté d'une grosse par exemple. C'est ce qui est appelé « Aspect Ratio Dependand Etch ». Aussi, pour vérifier approximativement que la gravure atteint l'oxyde au niveau des peignes interdigités et que les parois sont bien verticales, les motifs ci-après ont été ajoutés au masque. Cependant, ces motifs impliquent une destruction d'échantillon car il est nécessaire de couper à travers les tranchées afin de vérifier le profil de la gravure ainsi que la profondeur atteinte.

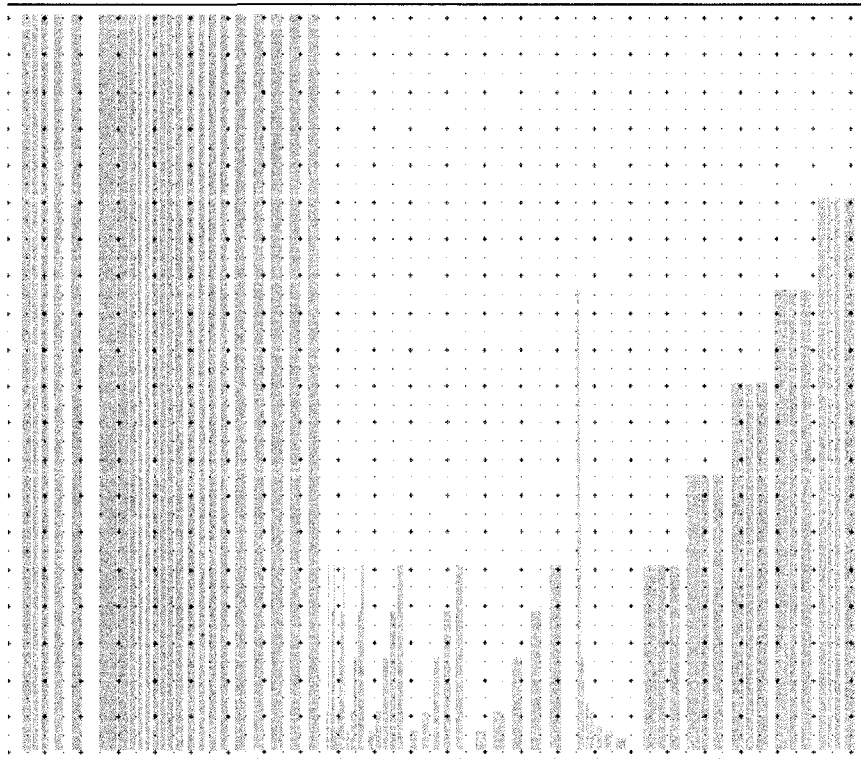


Figure 3.9 Motifs tests pour la gravure DRIE ICP

Pour finir, des lignes de sciages ont été dessinées afin de faciliter l'accès des fibres optiques aux structures et permettre le découpage d'échantillons d'environ 2 cm^2 (puce). Suite à l'évolution du procédé et des structures, un deuxième masque a dû être fabriqué. Le même principe de réalisation de plusieurs niveaux de masques sur un seul a été utilisé sur le masque 2. Pour ce faire, il a été séparé en 4, chaque cadran représentant un niveau de masque (cf. Figure 3.10) : le cadran 1 représentant le masque pour la première lithographie des structures dans la couche supérieure de silicium de la plaquette SOI, le 2, la seconde lithographie pour la définition des tranchées (« grooves ») dans l'oxyde enterré et le cadran 3 étant dédié à la définition des contacts métalliques.



Figure 3.10 Masque 2 : répartition des motifs dans les cadrans identifiés 1 à 3

Des motifs d'alignements ont été introduits dans ce masque (cf. Figure 3.11); ceux-ci permettent de superposer aussi précisément que possible les motifs, tout au long des étapes.

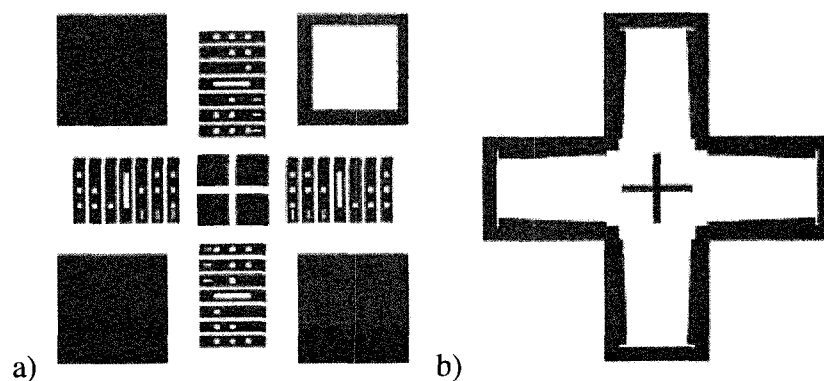


Figure 3.11 Motifs d'alignement a) structure 1 : support d'alignement; b) structure 2 : croix d'alignement

Les motifs d'alignement sont composés de deux structures composées de croix et de rectangles comme indiqués sur la figure 3.11. Chacune des structures est associée à un des niveaux de masque à aligner et leur superposition parfaite permet de faire en sorte que les motifs à fabriquer soient précisément alignés. Dépendamment de la taille des motifs à aligner, la précision de l'alignement nécessaire peut varier. Toutefois, les motifs d'alignement utilisés permettent d'aligner avec une précision de l'ordre du micron. La première étape de l'alignement consiste à faire correspondre la petite croix du centre de la première structure à celle du centre de la deuxième structure d'alignement. Ensuite, afin de s'assurer d'une précision au micromètre près, les repères plus élaborés situés sur les pales de la grande croix sont utilisés. En effet, les carrés et les rectangles qui se trouvent aux quatre extrémités de la croix sont des motifs de mesure (cf. Figure 3.12). Chaque carré correspond à un micron de recouvrement et chaque rectangle à un micron d'espacement entre la croix de la structure 1 et la bordure de croix de la structure 2. Ainsi, une ligne où se retrouvent trois carrés par exemple signifie qu'à cet endroit la croix et sa bordure doivent se chevaucher de trois microns tandis qu'une ligne avec trois carrées et un rectangle à côté représente une distance de trois microns entre la croix d'alignement de la barre du support d'alignement. Quant aux endroits avec un gros rectangle, ils correspondent à une distance entre les 2 structures inférieure à 1 micron.

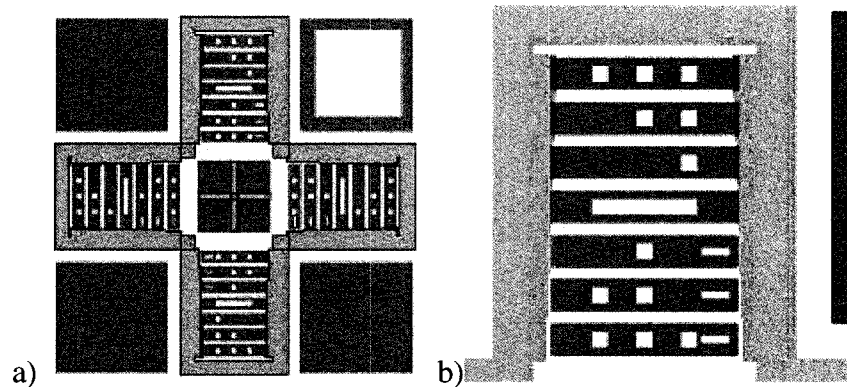


Figure 3.12 Croix alignée avec son support :a) motif entier; b) zoom sur les détails de la croix

Du fait de la limite de résolution du masque à la fabrication, les structures ont été dessinées de façon à ce qu'il n'y ait pas d'éléments de taille inférieure à 1,5 μm . Cependant les motifs tests ont été conservés et ceux qui étaient de taille inférieure sont de piètre qualité sur le masque. La qualité générale du masque était moyenne d'où une perte de résolution dans les motifs mais celle-ci demeurerait tout à fait acceptable pour le développement du procédé de fabrication.

3.3.1.2 Promoteur d'adhésion

Lors de la photolithographie avec des résines peu visqueuses, il est nécessaire d'appliquer un promoteur d'adhérence sur le silicium avant de procéder au revêtement. Cette substance a pour rôle de réduire l'énergie de surface afin d'améliorer la qualité du recouvrement ainsi que de diminuer la surgravure en dessous du masque de résine (« undercut ») et les risques de décollements de résine.

Dans le cas présent de l'hexamethyldisilane (HMDS) est le promoteur utilisé. Le HMDS, est l'un des promoteurs d'adhérence les plus utilisés dans l'industrie des semiconducteurs. La surface est « silanisée » pour permettre une meilleure adhésion du film photosensible, un meilleur recouvrement et ainsi prévenir l'« undercut » et le décollement des motifs au cours du développement ou de la gravure. Le principal effet du HMDS est de réduire la tension de surface du substrat. Ceci est fait grâce à la réaction chimique qui a lieu entre les groupes polar hydroxyles et l'oxyde à la surface du substrat et les groupe trimethylsilyles [42]. Cette réaction produit une monocouche à la surface de la gaufre (cf. figure 3.13 suivante).

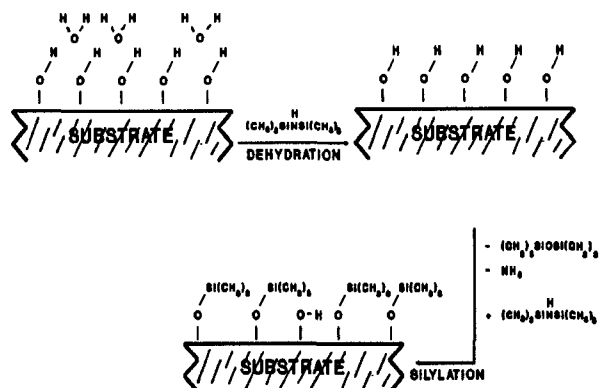


Figure 3.13 Réaction chimique à la surface du substrat lorsque le HMDS est appliqué [42]

Le fait que le substrat soit nettoyé avec des agents oxydants permet un meilleur effet du promoteur d'où une adhésion améliorée. De meilleurs résultats sont obtenus en appliquant le HMDS en vapeur sur les échantillons ; toutefois, dans le cas présent, le promoteur était disponible sous forme liquide et il a donc été appliqué par tournette sur les échantillons. Les spécifications et propriétés du produit sont jointes en Annexe 2.

3.3.1.3 Photorésine

La résine SP1813 est une résine positive fluide utilisée pour des dépôts fins de l'ordre de 1,5 à 2 microns, afin de permettre des résolutions de photolithographie très élevées. En effet, des motifs de l'ordre de 0,5 μm peuvent être obtenus. Dans le cas présent, du fait de la limitation de résolution du masque, l'obtention de motifs aussi petits n'est pas nécessaire. Par ailleurs, même si la S1813 offre, selon le fabricant (cf. Annexe 3), une sélectivité à la gravure au plasma de SF₆ de l'ordre de 50 : 1 (soit 1 μm de photorésine de masquage gravé pour une profondeur de silicium gravé de 20 μm), il faut que la couche soit suffisamment épaisse pour résister en tant que masque lors de la gravure DRIE. La recette utilisée pour effectuer la photolithographie devait en conséquence respecter ces critères. Les paramètres de la recette utilisée sont répertoriés dans le tableau A4.1 en annexe 4.

L'application de cette recette a permis de déposer des couches de résine de $\sim 2 \mu\text{m}$ d'épais où des motifs aussi précis que $1 \mu\text{m}$ ont pu être résolus comme l'indiquent les motifs tests de lithographie (cf. figure 3.8). Des tests de gravure sur la résine ont permis d'observer une sélectivité à la recette de gravure utilisée de 35 :1. Cette valeur expérimentale est plus basse que celle théoriquement prévue; toutefois, pour l'épaisseur de $10 \mu\text{m}$ qu'il faut atteindre dans cette gravure, l'épaisseur de résine convenait largement et il a donc été décidé de conserver ces paramètres de photolithographie.

Après la gravure des structures dans la couche supérieure de la gaufre SOI, une autre étape de lithographie était prévue afin de creuser plus profondément dans l'oxyde puis le substrat de silicium les tranchées destinées aux fibres optiques. Celle-ci devait être réalisée sur une surface présentant des topologies de $10 \mu\text{m}$ et devait résister à une gravure profonde par plasma d'environ $50 \mu\text{m}$ d'où la nécessité d'utiliser une résine épaisse. Le choix s'est porté sur la SPR-220 qui est une résine positive très visqueuse et épaisse pouvant donner des épaisseurs de résine allant jusqu'à $30 \mu\text{m}$! La photorésine SPR-220 7.0 a donc été utilisée, en adaptant les paramètres de dépôt pour avoir un bon recouvrement des topologies. Pour ce faire, différents temps de repos ont été introduits entre les étapes afin de planariser la couche de résine et bien remplir les trous pour qu'il n'y ait pas de bulles d'air. Ainsi, la résine était appliquée sur l'échantillon, puis laissée à reposer pendant environ 30 minutes, le temps de bien s'écouler dans les cavités. Ensuite, l'étalement était effectué par tournette, à basse vitesse pour que la résine soit bien étalée sans pour autant « désemplir » les cavités des structures préalablement gravées. Après le recuit avec une rampe de température, l'échantillon était laissé à refroidir progressivement sur la plaque afin d'éviter que les changements brusques de température ne la fasse craquer. Ces mesures ont permis d'avoir de bons recouvrements de résine tout en évitant les bulles d'air et les craquelures (cf. tableau A6.1 en annexe 6 pour le détail des paramètres de la recette utilisée).

Néanmoins, l'alignement des structures s'est révélé fastidieux et le manque de précision dû à l'équipement était trop contraignant ce qui a motivé l'orientation vers une gravure en une seule étape. Il s'agissait alors de graver en une seule fois les structures ainsi que des tranchées suffisamment profondes pour aligner la fibre optique de manière adéquate avec

les dispositifs. C'est ainsi que le développement de la fabrication s'est orienté vers l'utilisation de gaufres SOI ayant une épaisseur de la couche supérieure de silicium de 70 microns.

Le fait de graver par plasma sur une profondeur de 70 μm requiert un masque de résine épais et il a donc fallu utiliser à nouveau la SPR 220. Néanmoins, une version moins épaisse, la SPR 220 3.0, un peu moins visqueuse et plus facile à manipuler a été utilisée pour développer le procédé vu que la photolithographie était effectuée sur une surface vierge de silicium. À partir des spécifications du fabricant (cf. Annexe 5), la recette décrite au tableau A6.2 (cf. annexe 6) a été développée, donnant des épaisseurs de résine de 4 μm , en moyenne, où des motifs de l'ordre de 1,5 μm ont pu être résolus.

Le masque de résine ainsi obtenu est beaucoup consommé au cours de la gravure car la sélectivité obtenue expérimentalement est de 22 :1. Cependant, il en reste une quantité suffisante (0,75 μm de résine résiduelle) pour protéger les surfaces qui ne doivent pas être exposées.

3.3.2 Gravure profonde DRIE par plasma ICP

La gravure DRIE est une méthode physico chimique de gravure sèche du silicium à l'aide d'un plasma créé par inductance. Cette technique de gravure permet de graver de manière anisotrope le silicium, créant ainsi des tranchées profondes et verticales avec des facteurs de forme (aspect ratio) élevés. Deux techniques sont principalement utilisées. La méthode BOSCH consiste à alterner des étapes de gravure et de dépôt pour passiver la surface et ainsi protéger les flancs gravés. Quant à la méthode CRYO, elle est réalisée à très basse température ce qui ralentit les réactions chimiques et privilégie la gravure physique directionnelle. Dans le cadre de ce projet, la gravure DRIE BOSCH avec source ICP (inductively coupled plasma) a été réalisée avec un équipement de la compagnie Oxford (PlasmaLab System 100). En effet, les tests de gravure ont été réalisés sur des échantillons de $\sim 1,5 \text{ cm} \times 1,5 \text{ cm}$ (environ une douzaine par gaufre SOI de 4 pouces) car les gaufres SOI sont très coûteuses. Ainsi, l'équipement étant fait pour manipuler des tranches de 4 pouces, la gravure de ces échantillons par DRIE nécessitait un collage sur une gaufre

de support protégée par une couche épaisse de résine. Il était donc très difficile de garantir un refroidissement uniforme de l'échantillon aux températures extrêmes (-120°C) nécessaires en gravure CRYO et il a donc été décidé de faire l'optimisation avec une gravure BOSCH.

Cette étape de gravure représente une étape critique dans le procédé car les structures sont définies dans la couche supérieure de silicium de la plaquette SOI et il est alors très important de faire en sorte d'obtenir des parois aussi verticales et lisses que possible pour servir de miroir de Bragg. Les détails du principe de fonctionnement du procédé BOSCH ainsi que des paramètres critiques, leur influence sur la gravure et la façon dont ils ont été optimisés sont présentés ci-après.

3.3.2.1 Principe de fonctionnement

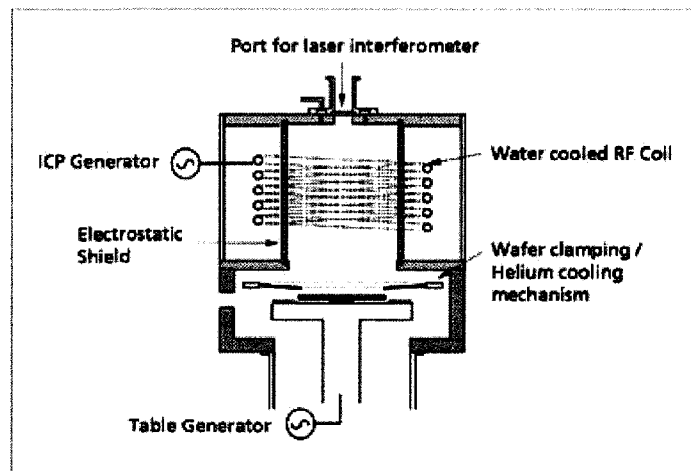


Figure 3.14 Schéma d'une chambre de gravure DRIE ICP [43]

La chambre de gravure DRIE ICP est disposée comme indiqué sur le schéma de la figure 3.14 ci-dessus. La gaufre repose sur un porte-substrat où elle est fixée soit mécaniquement par un anneau de support en quartz, soit par électrostatique. Sa température est contrôlée par un refroidissement au dos avec de l'hélium gazeux et il est possible de la polariser en lui appliquant une tension bias afin d'accélérer les ions vers sa surface. Juste au dessus de la gaufre se trouve le tube où est généré le plasma. Une bobine enroulée à l'extérieur de ce tube sert à créer le champ inductif nécessaire au démarrage du plasma. En effet, le plasma

est généré en introduisant les gaz par le dessus de la chambre puis en appliquant une tension RF dans la bobine créant ainsi un champ magnétique induit qui va ioniser les particules gazeuses. Celles-ci sont ensuite attirées par la tension appliquée sur le substrat et vont bombarder ce dernier aux endroits exposés par le masque. La gravure est chimique du fait des radicaux fluorés du SF_6 qui réagissent avec le silicium mais aussi physique du fait que les ions accélérés viennent attaquer le substrat. Il est donc important de contrôler les différents paramètres en jeu (présentés ci-après) afin d'avoir la combinaison permettant de graver suffisamment en profondeur, tout en préservant l'anisotropie et en ayant aussi peu d'effet de « scalloping » que possible. Cet effet de la gravure BOSCH sera expliqué plus en détail dans le paragraphe suivant.

La réaction chimique permettant de graver le silicium avec les radicaux fluorés du SF_6 résulte en une gravure isotrope ne privilégiant aucun plan cristallin. Aussi, l'anisotropie est obtenue par la « directionnalisation » du bombardement ionique en appliquant une tension. Toutefois, afin de graver profondément des parois droites, l'utilisation de la méthode BOSCH est requise. Celle-ci consiste à protéger les parois verticales du silicium en déposant un polymère formé à partir d'un plasma de C_4F_8 . Des cycles composés d'une étape de gravure suivie d'une protection des flancs (dépôts) sont ainsi utilisés (cf. Figure 3.15). Il devient ainsi possible de graver verticalement et profondément comme indiqué sur la figure ci-après [43].

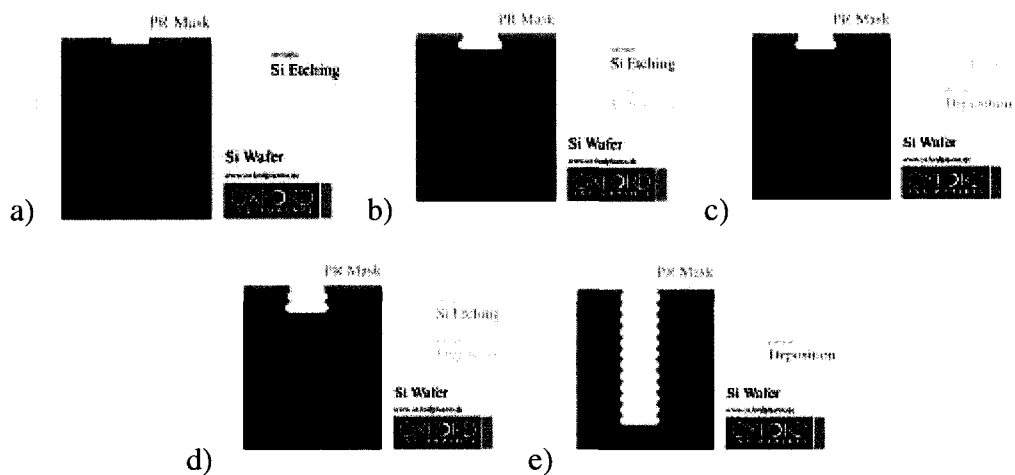


Figure 3.15 Procédé de gravure BOSCH [43]

Toutefois, lors des étapes de gravure, la gravure chimique est toujours présente et son isotropie se manifeste d'où la présence de rugosités sur la paroi désignées sous le nom de « scalloping » (cf. figure 3.16).

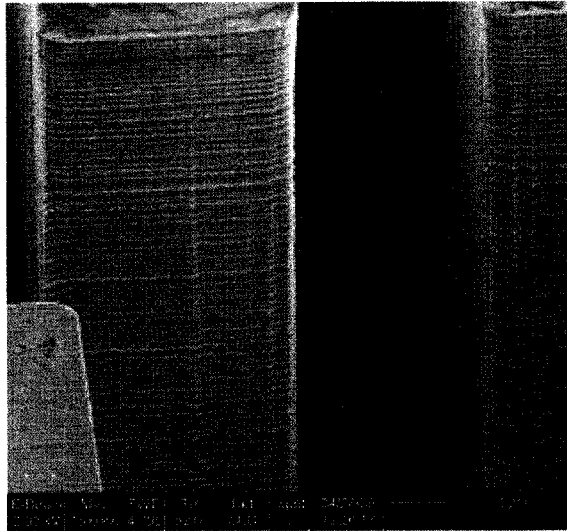


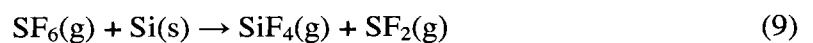
Figure 3.16 « Scalloping » observé sur les parois de silicium suite à une gravure BOSCH

3.3.2.2 Paramètres d'optimisation

Différents paramètres permettent de contrôler le taux de gravure ainsi que la rugosité et la verticalité des parois obtenues et il a donc fallu varier ces paramètres afin d'obtenir des parois aptes à faire de bons miroirs de Bragg.

➤ Les gaz en présence, leur débit et la pression

Lors de la gravure BOSCH du silicium, deux principaux gaz sont utilisés : le SF_6 et le C_4F_8 . Le premier est utilisé pour graver le silicium selon la réaction suivante :



En effet, la décomposition du SF_6 produit des radicaux de fluor qui gravent le silicium spontanément et de manière isotrope en formant du SiF_4 volatile.

Quant au C_4F_8 , il est utilisé pour déposer une couche de passivation constituée d'un polymère carbofluoré sur toutes les surfaces « froides » par condensation.

Ces deux gaz sont ionisés afin de générer un plasma dans lequel la densité d'ions dépend grandement du débit initial. Aussi, le contrôle du débit des gaz est primordial afin de densifier ou non le plasma et ainsi contrôler le taux de gravure et le taux de dépôt.

➤ La puissance source (ICP)

La puissance source de l'ICP correspond à la puissance du plasma. C'est elle qui détermine le taux d'ionisation du plasma (densité des ions). C'est une puissance RF d'une fréquence de 13,56 MHz appliquée à la bobine d'induction. Plus la puissance source est élevée, plus le plasma est ionisé, et plus il y a d'ions et donc de gravure physique.

➤ La puissance « platen »

La puissance « platen » est la puissance appliquée sur le porte-substrat afin de polariser l'échantillon, permettant ainsi l'accélération des ions vers le substrat. Elle contrôle l'énergie des ions et permet de les directionnaliser afin que ceux-ci aillent bombarder les fonds horizontaux des structures. Lors de l'étape de gravure, cela a pour effet d'enlever le polymère dans le fond et non sur les parois verticales, d'où l'anisotropie des profils. De fait, augmenter la tension biais lors de la gravure contribue à l'élimination du « grass » dû au micromasquage mais peut causer un bombardement indésirable des parois et l'attaque des murs.

➤ La température du substrat

La température à la surface du substrat est un paramètre déterminant pour ce qui est de la profondeur atteinte et de l'uniformité de la gravure. Dans le procédé Bosch, l'étape de gravure n'est pas sensible à la température. Quant à l'étape de passivation, elle exhibe une dépendance linéaire du taux de déposition qui diminue proportionnellement à la température. De fait, si le rebord de tranche est plus froid que le centre, une épaisseur plus importante de polymère est déposée en rebord de tranche lors de l'étape de passivation. Or, le SF_6 grave la même quantité de polymère sur toute la tranche, ce qui fait qu'il en reste plus en rebord d'où les phénomènes de micromasquage et le manque d'uniformité de la gravure.

Lors de la gravure par DRIE ICP du silicium, la face exposée de la tranche reçoit une grande quantité d'énergie et sa température augmente. Toutefois, la face qui repose sur le porte-substrat reçoit un flux d'hélium servant à évacuer cette chaleur et à refroidir le porte-substrat. Au final, la température effective à la surface de la tranche va dépendre du ratio apporté à la surface versus l'énergie évacuée. L'apport d'énergie provient du bombardement ionique, de la réaction chimique de gravure, ainsi que de la radiation du plasma et des surfaces chaudes environnantes (parois de la chambre de réaction). Toutefois, le plus significatif provient de la réaction chimique du silicium avec le gaz fluoré. Cette énergie est proportionnelle à la quantité de silicium gravée par unité de surface et de temps et donc au taux de gravure et au pourcentage d'exposition. Ainsi, une hausse significative du taux de gravure nécessite une évacuation efficace de la chaleur générée par la réaction. En effet, une température trop élevée empêche la condensation du polymère lors de la passivation et peut faire couler le masque de résine.

Un compromis doit alors être fait afin de choisir la température du porte-substrat ainsi que le flux d'hélium permettant de garder un taux de gravure acceptable tout en étant uniforme et en évitant de sur passer la gaufre.

➤ Les temps de gravure et de dépôt

Le temps de gravure correspond à la période de temps où le SF_6 est introduit dans la chambre, et ionisé et afin que ions bombardent le polymère dans les fonds horizontaux puis que les radicaux fluorés réagissent avec le silicium. Quant au temps de dépôt, il correspond à la période où le C_4F_8 est introduit dans la chambre et ionisé pour que les polymères fluorocarbonés se déposent par condensation sur les parois. L'ajustement des durées des étapes de gravure et de dépôt dans un cycle de gravure BOSCH joue un rôle prédominant dans le profil de gravure obtenu et la taille du « scalloping ». En effet, en augmentant par exemple, la durée de l'étape de gravure, les radicaux libres ont plus de temps pour atteindre les espaces à graver qui sont confinés et les produits de réaction sont évacués plus efficacement. Cependant, cela augmente aussi l'isotropie de la gravure et les profils risquent d'être moins droits et les parois plus rugueuses. En augmentant le temps de dépôt, une couche plus épaisse de passivation est déposée sur les parois. Certes, celle-ci protège

mieux les flancs de la gravure, mais cela prend aussi plus de temps de bombardement lors de la gravure pour l'enlever du fond des structures et le taux de gravure en est alors réduit. Dans le cas extrême, la couche est trop épaisse et le temps de bombardement ne suffit pas à l'enlever, ce qui met fin à la gravure.

Dans le cas présent, afin d'avoir des murs lisses, le temps de gravure a été réduit à 5s et le temps de dépôt ajusté à 3s afin de protéger les parois tout en évitant la surpassivation. Le tableau A.7 à l'annexe 7 présente les paramètres finaux utilisés pour la gravure sur 70 μm de profond.

3.3.3 Décapage de la photorésine

Suite à la gravure DRIE, le masque de résine est durci et il est alors difficile de l'enlever efficacement avec de l'acétone. De plus, il reste de la passivation sur les parois résultant du procédé BOSCH. Un nettoyage a ainsi été mis en place pour éliminer la couche de résine résiduelle et la passivation. Tout d'abord, un décapage par plasma d' O_2 dans une chambre de gravure par ions réactifs (RIE) est effectué, suivi d'une immersion de 10 minutes dans une solution de Piranha.

3.3.4 Libération des structures

La libération consiste à suspendre les structures mobiles en les faisant reposer sur une cavité. Pour ce faire, la couche sacrificielle d'oxyde de silicium est gravée en dessous de ces structures. Il faut ainsi graver le SiO_2 exposé, puis surgraver suffisamment en dessous du silicium pour que les structures libérées « flottent ». La gravure de l'oxyde en elle-même ne comporte pas réellement de difficulté vu que le taux de gravure du SiO_2 dans l'acide fluorhydrique (HF) est bien contrôlé et dès lors, il suffit de connaître l'épaisseur à graver afin de déterminer le temps d'immersion. Toutefois, la libération par HF humide comporte de très grands risques de collage. La stiction ou collage est un phénomène qui résulte de la présence de liquide en dessous des structures flottantes. Par effet de tension de surface, le liquide, en se retirant, attire les structures vers le fond et celles-ci se retrouvent donc collées

au substrat en dessous de la couche sacrificielle. Ceci peut causer la rupture des structures et les rendre inutilisables (cf. figure 3.17).

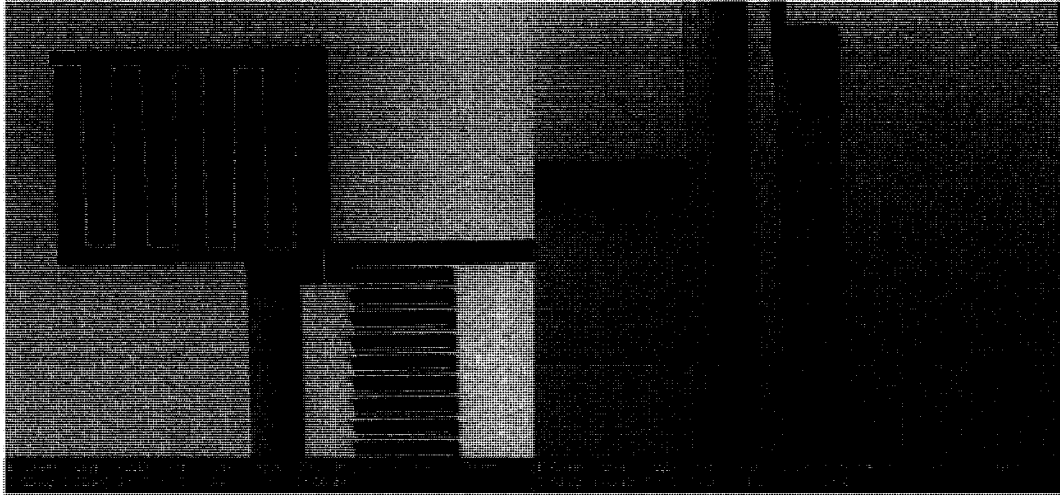


Figure 3.17 Images SEM de structures collées au substrat suite à une libération par HF liquide

Pour remédier à cela, il a été décidé de procéder à la libération par HF vapeur. En effet, à température ambiante, le HF 49% s'évapore; aussi, en réalisant la gravure par vapeur, il n'y a pas de liquide qui se retrouve en dessous des structures et donc pas de collage.

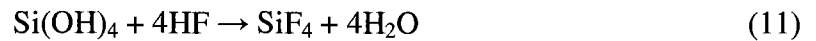
Cette gravure a été testée avec un équipement de la compagnie Idonus. Celui-ci est composé d'un réservoir où est conservé le HF liquide, relié à la chambre de réaction qui, elle, est recouverte d'un porte substrat électrostatique (la gaufre peut aussi être fixée mécaniquement sur le porte-substrat) (cf. Figure 3.18). Un élément chauffant intégré au porte-substrat permet d'en contrôler la température. Lorsque que la valve est ouverte, le HF est transféré dans la chambre de réaction et il suffit alors de refermer dessus le porte-substrat préalablement réglé à la température voulue avec l'échantillon fixé dessus électrostatiquement (le clamping mécanique ne marche que sur des gaufres entières et non sur des morceaux). Le procédé démarre immédiatement et il est donc primordial de porter attention au temps de gravure. La vitesse de gravure dépend du type d'oxyde gravé mais aussi de la température à laquelle est maintenu le substrat. Celle-ci peut être réglée entre 30°C et 60°C. Ce chauffage a été introduit pour maintenir l'équilibre entre la quantité d'eau

nécessaire pour initier la réaction et la quantité d'eau qui réagit, afin de conserver un procédé aussi « sec » que possible [44]. En effet, la réaction qui a lieu est en deux temps :

- tout d'abord des groupes silanes sont formés par adsorption de l'eau à la surface de l'oxyde :



- puis ces groupes silanes sont gravés par le HF :



Il faut alors chauffer suffisamment pour qu'il n'y ait pas trop d'eau qui se condense à la surface mais pas trop pour que la réaction puisse avoir lieu.

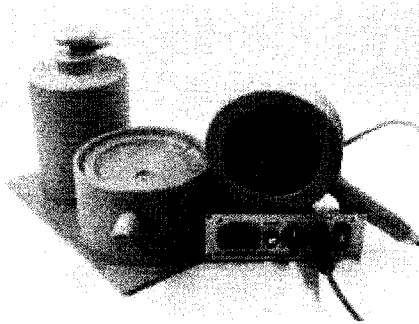


Figure 3.18 Système de gravure par HF en phase vapeur [44]

Les images SEM suivantes (cf. Figure 3.19) permettent de voir que la libération par HF vapeur permet de libérer les structures en évitant de les coller.



Figure 3.19 Images SEM de structures libérées sans collage, par HF vapeur

Toutefois, les résultats obtenus sur les échantillons se sont montrés difficilement reproductibles d'un échantillon à l'autre et les temps de gravure sont plutôt élevés (environ 1 heure). En l'absence d'alternative, la libération par HF en phase vapeur était la seule solution fiable. Cependant, la réception d'un équipement de séchage par CO₂ supercritique a permis de tester une autre méthode pour la libération. Celle-ci consiste à graver par HF en phase liquide l'oxyde de silicium puis à procéder au rinçage en veillant à maintenir l'échantillon tout le temps humide. Trois rinçages à l'isopropanol sont ensuite réalisés dans les mêmes conditions puis l'échantillon, toujours humide est placé dans le « critical point dryer » (CPD). Dans cet équipement, l'échantillon baigne d'abord dans de l'alcool, la chambre est ensuite remplie de CO₂ liquide pendant que l'alcool est pompé. Une fois que la chambre n'est plus remplie que de CO₂ liquide (point A sur le diagramme de phase de la figure 3.18), la pression est montée à 1200 psi en augmentant la température afin de passer au dessus du point critique du CO₂ (cf. figure 3.20, point B), la pression est ensuite baissée et le CO₂ passe alors en phase vapeur (cf. Figure 3.18, point C) et l'échantillon est séché sans qu'il n'y ait eu de transition de phase générant une stiction liée à la tension de surface du liquide se retirant de la cavité gravée.

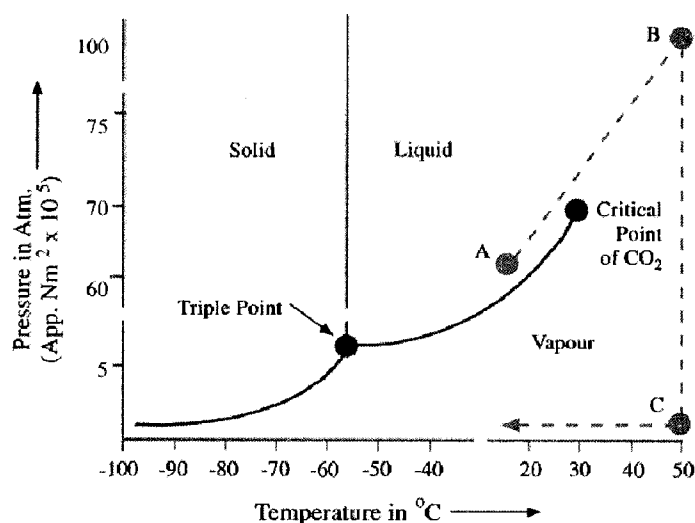


Figure 3.20 Diagramme de phase du CO₂ et points d'opération du CPD [45]

En termes de temps, même si la gravure en elle-même ne dure que 8 minutes, les étapes subséquentes de rinçage puis le passage dans l'équipement CPD font que le procédé prend

autant voire plus de temps que la gravure par HF vapeur, pour un résultat sans stiction tout à fait similaire. Toutefois, les résultats obtenus en utilisant le séchage super critique se sont montrés plus facilement reproductibles et il a donc été décidé d'effectuer la libération des structures par cette méthode.

3.4 Résultats de fabrication

Les structures qui ont ainsi pu être fabriquées sont présentées sur les images MEB suivantes :

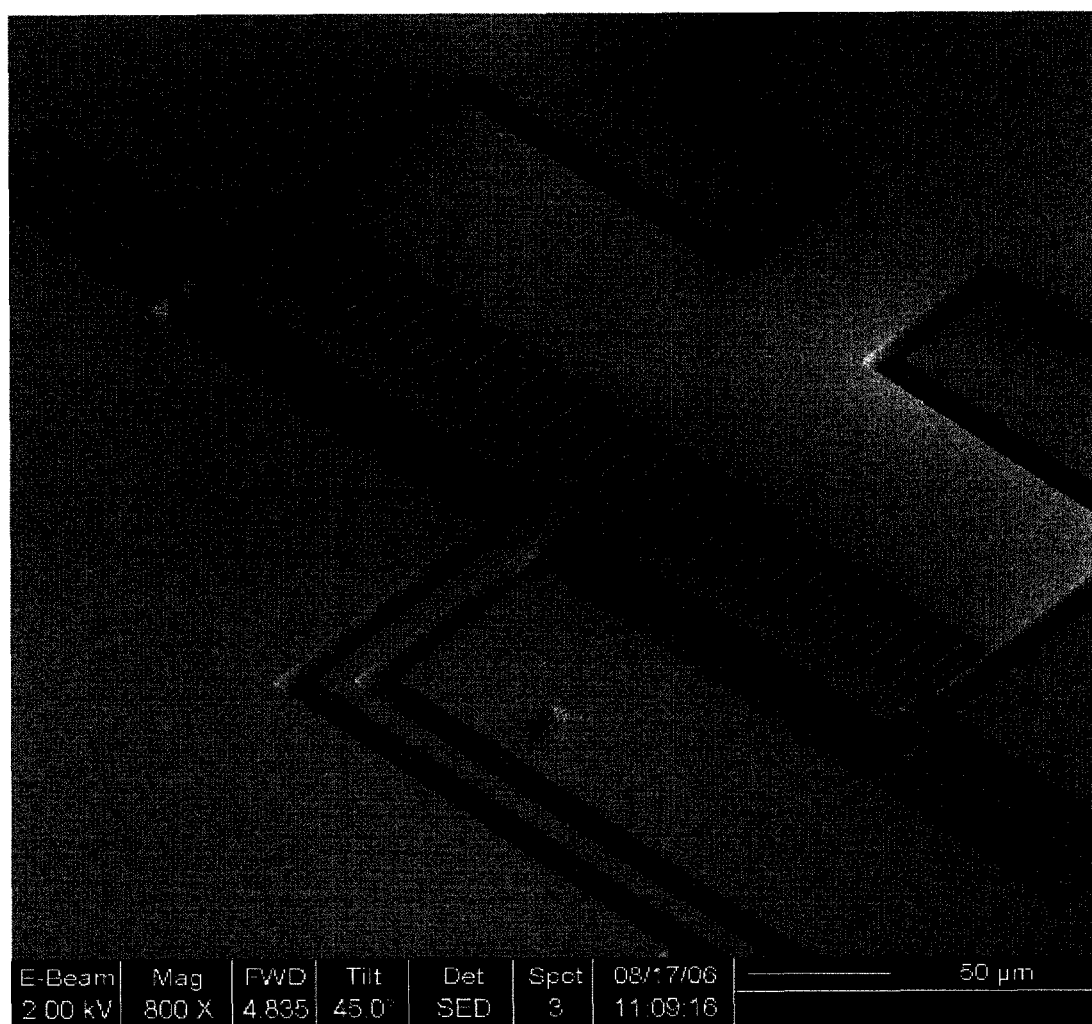


Figure 3.21 Image SEM d'un peigne électrostatique gravé dans le silicium (SOI de 10 µm) et relâché sans stiction grâce au séchage avec le « critical point dryer ».

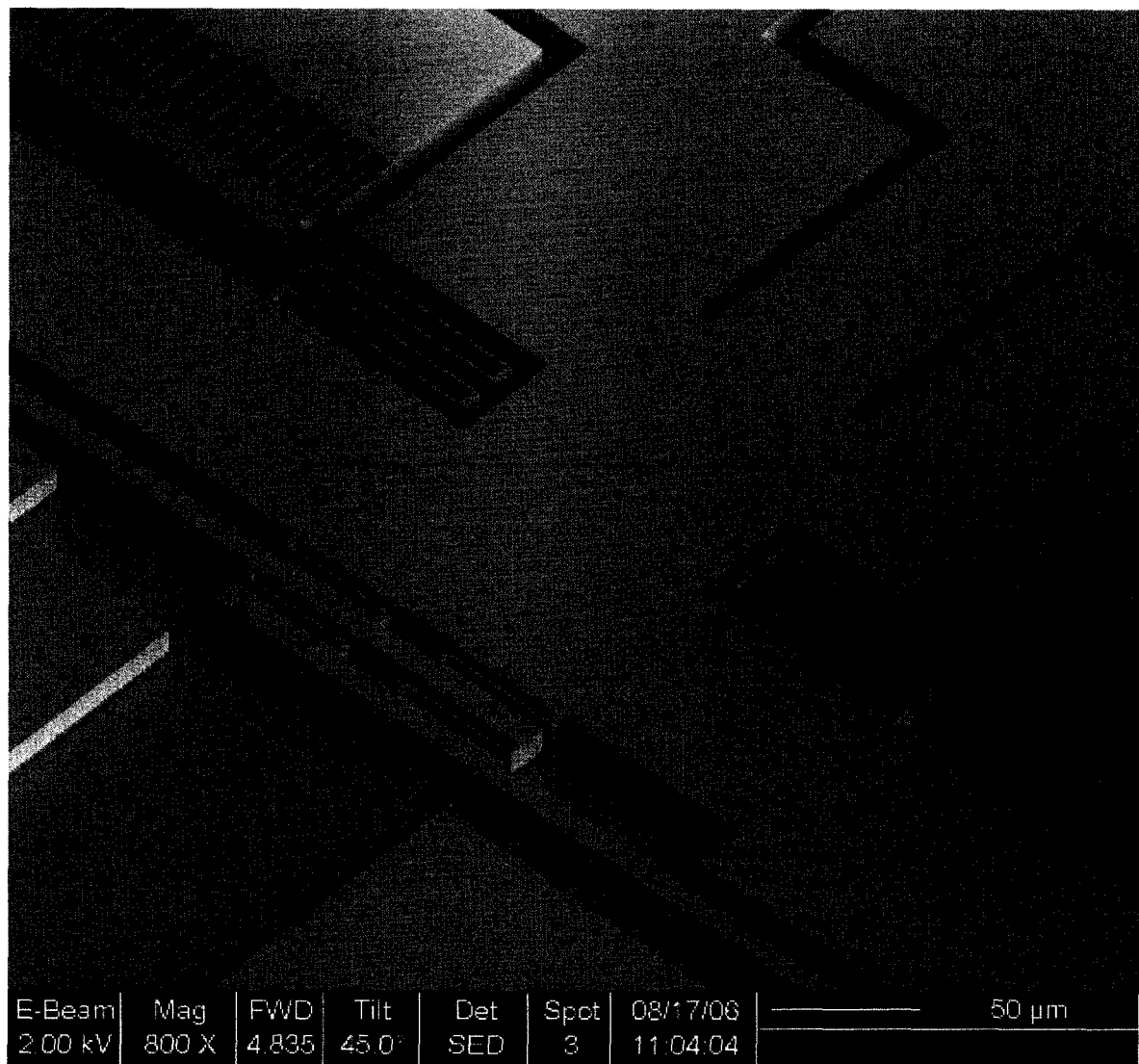


Figure 3.22 Image SEM d'une structure relâchée sur SOI 10 µm: vue d'ensemble des murs de Bragg et de ressorts servant de support aux peignes mobiles.

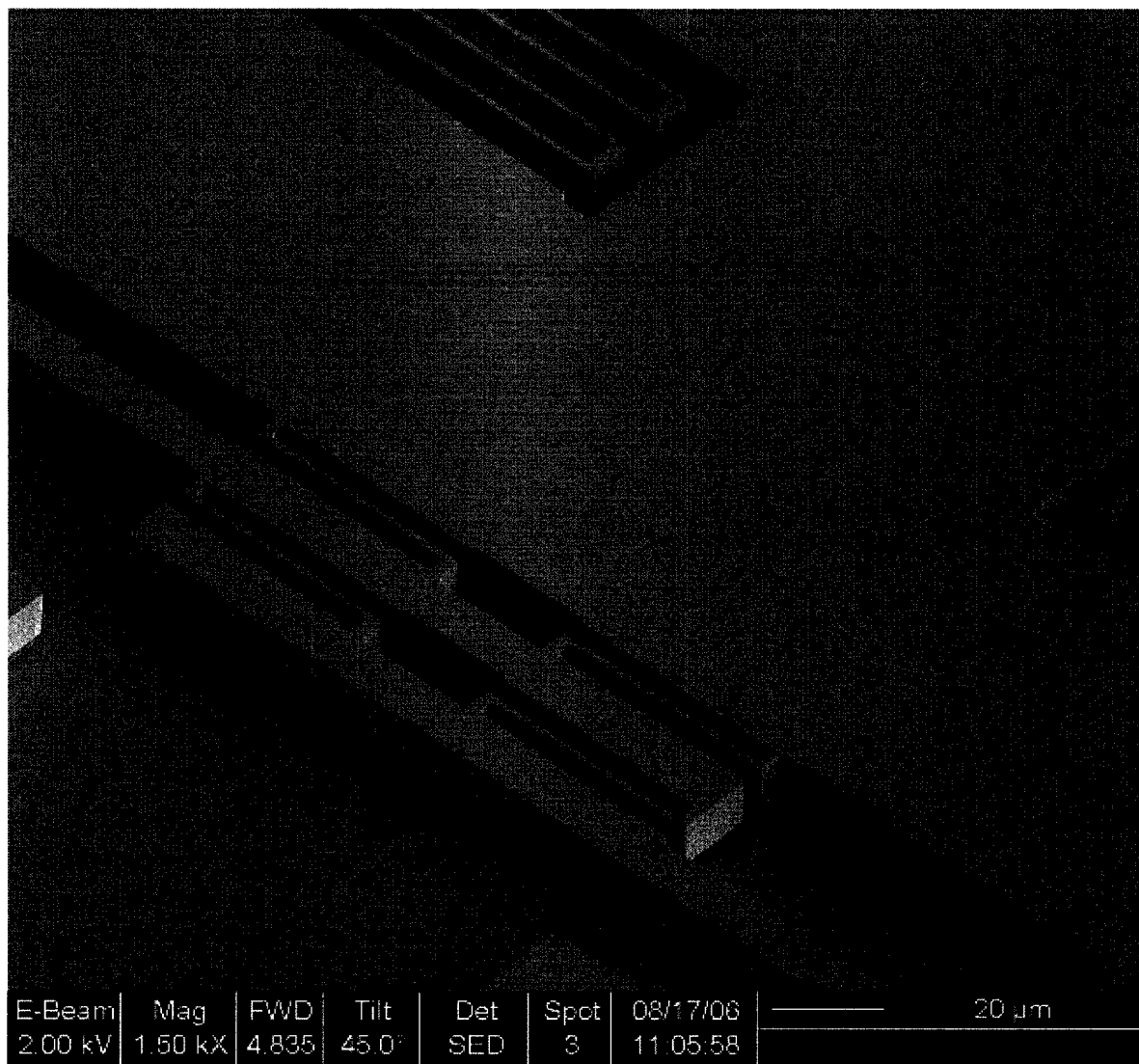


Figure 3.23 Image SEM des murs réflecteurs de Bragg après relâchement sur SOI 10 μm

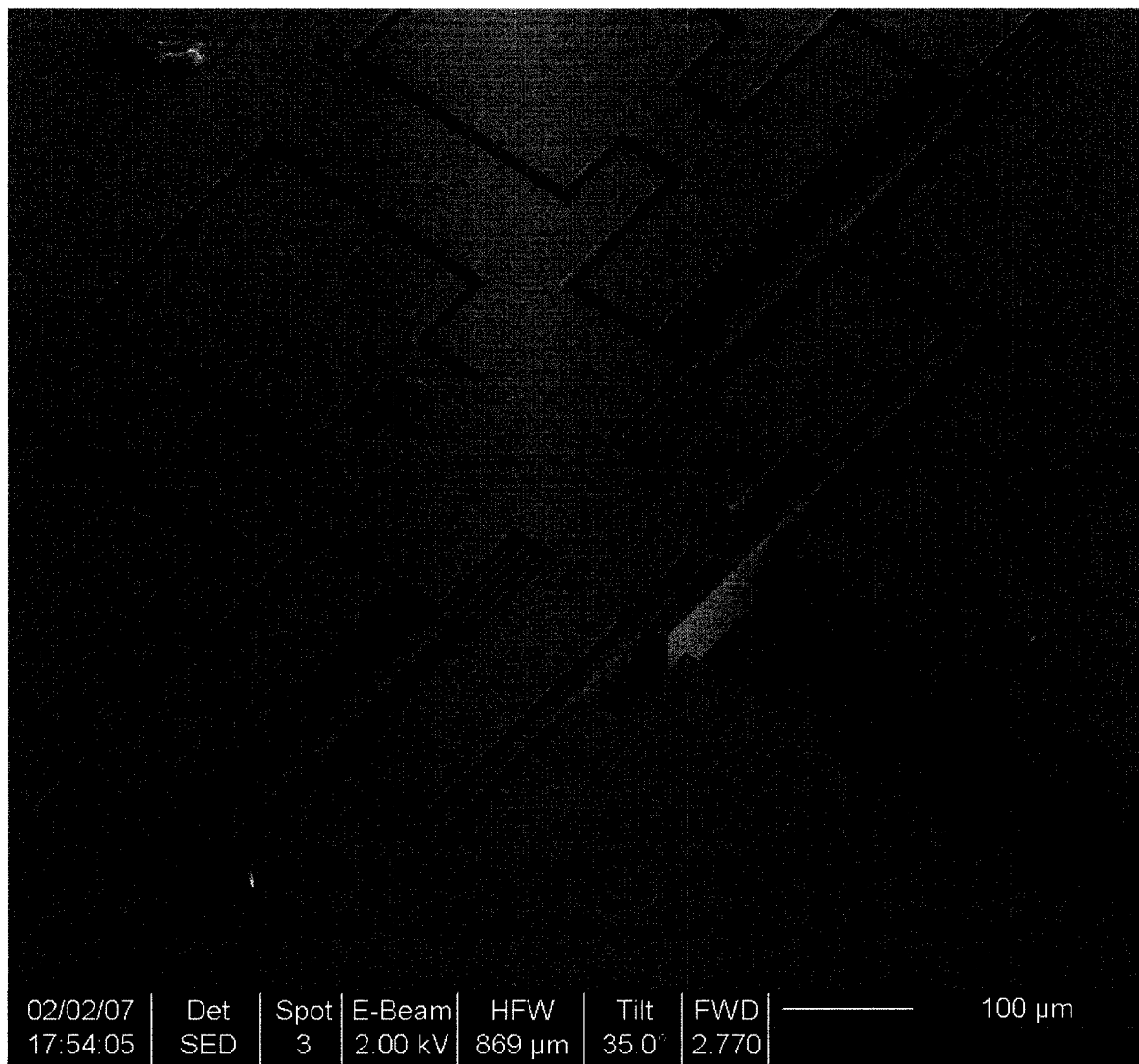


Figure 3.24 Image SEM d'une structure gravée et libérée sur SOI 70 μm (vue d'ensemble)

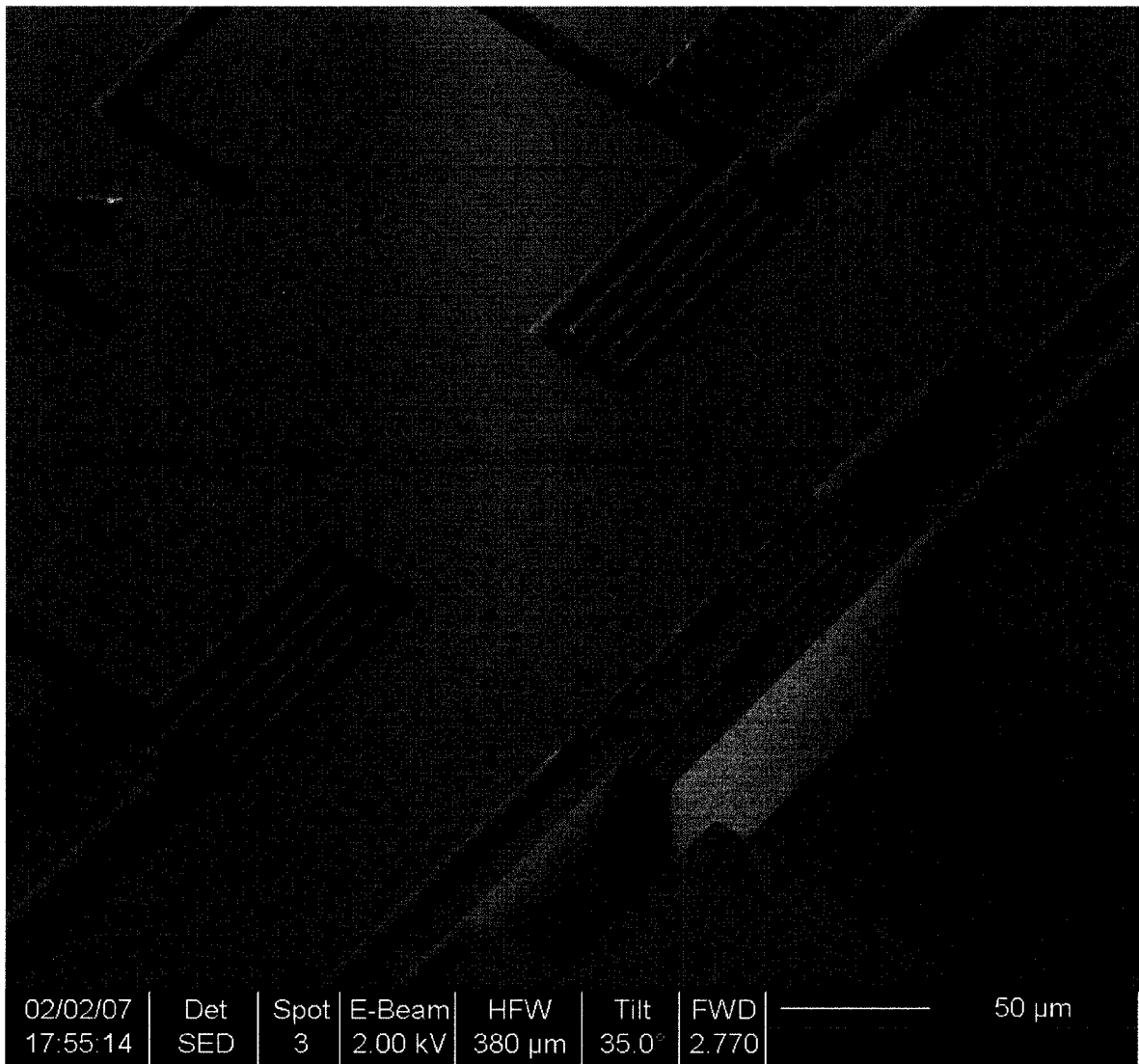


Figure 3.25 Image SEM d'une structure gravée et relâchée sur SOI 70 μ m (zoom sur les murs réflecteurs de Bragg)

CHAPITRE 4 Caractérisation

Une fois que le procédé de microfabrication a été développé et les structures fabriquées, il s'agissait de les tester afin de déterminer tout d'abord la qualité de la microfabrication, puis ensuite la qualité des structures elles-mêmes en terme de mouvement mécanique, de réponse électrostatique, mais aussi en terme de réponse optique.

4.1 Caractérisation mécanique

4.1.1 Description du montage

Le fait d'effectuer une caractérisation mécanique est un moyen simple de vérifier que les structures sont bien libérées et libre de leur mouvement tout en donnant une idée du comportement de la structure (si elle bouge comme prévu). Pour ce faire, le montage expérimental suivant a été utilisé : un microscope optique relié à une caméra et un écran avec à disposition une micropipette en verre chauffée et étirée pour en faire une pointe extrêmement fine. La pointe de verre peut être manipulée de façon très précise à l'aide d'un système de translation trois axes à piston (cf. Figure 4.1).

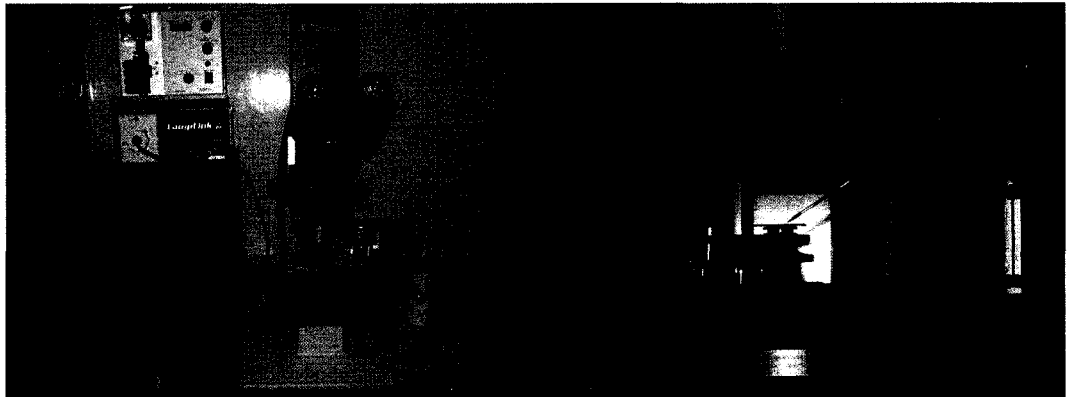


Figure 4.1 Montage de tests mécaniques : à gauche, vue d'ensemble du microscope; à droite, vue rapprochée de la pointe de verre.

4.1.2 Résultats et analyse

Les tests effectués sur ce montage consistaient à exercer une légère pression mécanique avec le bout de la pointe sur les structures mobiles afin de les faire bouger (cf. figure 4.2). Des vidéos des observations qui ont ainsi été faites ont pu être réalisées.

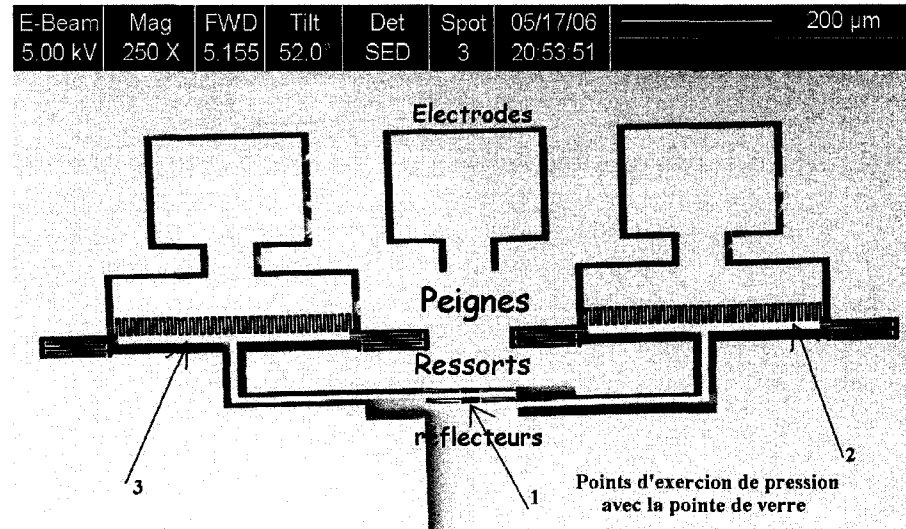


Figure 4.2 Points d'exercions de pression avec la pointe de verre sur la structure

On y voit que les peignes et les ressorts sont effectivement suspendus et bougent librement quand on pousse dessus. Il n'était pas possible à partir de ce montage de mesurer quantitativement l'amplitude du mouvement ni la force mécanique associée. Néanmoins, dans le design, l'amplitude maximale du mouvement dépendait des ressorts. Aussi, en les compressant au maximum, les murs pouvaient être bougés de $3,5\ \mu\text{m}$. Ainsi, en appuyant sur le point de pression 1 indiqué sur la figure, la pointe de verre permettait de pousser les murs sur cette distance (cf. Figure 4.3). Les ressorts étaient alors complètement compressés. Ce mouvement fait aussi bouger les peignes mobiles même si aucune tension n'est appliquée. Ceux-ci ont été dessinés avec un espacement de $5\ \mu\text{m}$ ce qui fait que la pression sur les murs réflecteurs ne les amène pas au point que le peigne mobile touche au peigne fixe.

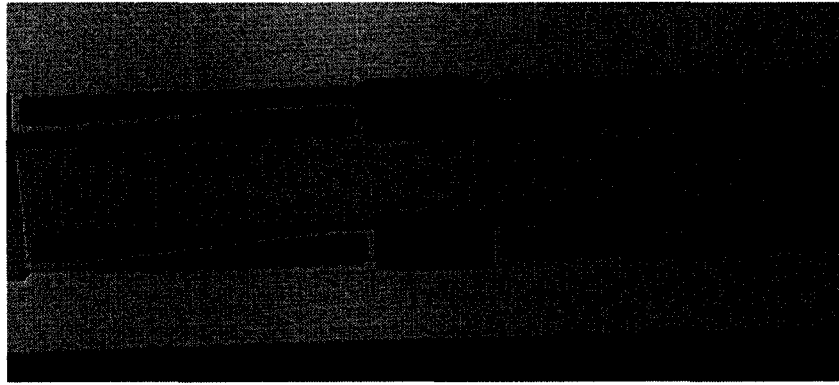


Figure 4.3 Illustration de ressorts compressés sur le dispositif

Il faut aussi noter que ces tests ont été destructifs dans le cas d'une pression trop brusque de la part de l'opérateur ou lorsqu'une pression continue d'être appliquée alors que la distance maximale de mouvement a été atteinte. Il en résulte alors une cassure nette des murs et des peignes auxquels ils sont reliés.

En appliquant une pression mécanique sur les peignes (points de pression 2 et 3 sur la Figure 4.2), cela fait bouger les murs réflecteurs, mais la compression des ressorts de ces murs est moins importante. Cela est sûrement dû au fait que les ressorts qui soutiennent les peignes sont plus longs et moins rigides que les ressorts des murs. Ainsi, cette expérience a permis de voir que le mouvement maximal prodigué aux murs par les peignes se fait sur une distance inférieure au parcours maximal permis par le design des murs.

4.2 Caractérisation électrique

4.2.1 Description du montage

La caractérisation électrique des microsystèmes fabriqués consiste à tester la réponse des peignes électrostatiques interdigités, donc des ressorts et des murs, à l'application d'une différence de potentiel. Cette différence de potentiel est appliquée entre les structures fixes et les structures mobiles afin d'induire un mouvement du fait de l'effet

de capacitance décrit dans la partie théorique (cf. chapitre 2). Cette caractérisation a été effectuée sur une station de tests sous pointe (« probe station ») : celle-ci est constituée d'un microscope, d'un porte-substrat à trois axes sur lequel l'échantillon est maintenu par succion ainsi que d'une plate forme avec un mouvement vertical (en z). Sur la plate forme, des micromanipulateurs sont fixés à l'aide de bases magnétiques et ce sont eux qui permettent de venir positionner les pointes au niveau des contacts électriques. Les pointes métalliques sont soudées à des fils électriques qui sont alors connectés à une source de tension DC. Le montage est illustré à la figure 4.4 avec une représentation schématique simplifiée du circuit électrique.

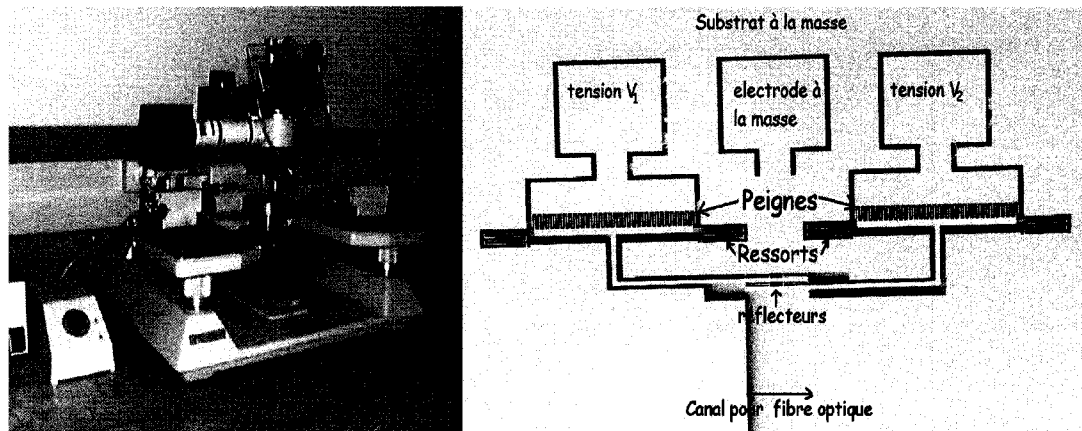


Figure 4.4 a) Station de tests sous pointes; b) Schéma du montage

Le substrat a été mis à la masse tandis qu'une tension est appliquée sur les deux autres électrodes. Étant donné que les contacts sont reliés aux peignes fixes, tandis que les peignes mobiles sont reliés au substrat, la différence de potentiel nécessaire à l'actionnement est ainsi obtenue.

4.2.2 Résultats et analyse

Quantitativement, il a été possible de déterminer à partir de quelle tension les peignes commencent à se déplacer et à quel moment la tension de claquage est atteinte. Il a ainsi été déterminé qu'une tension de 30V devait être appliquée avant d'observer un mouvement quelconque des peignes et des murs. Néanmoins, du fait des vibrations

environnantes (pompes des équipements du lab, ventilation, table non isolée, etc.) empêchant de distinguer des mouvements de très faible amplitude, il est supposé que des voltages inférieurs permettent des déplacements que le grossissement utilisé sur le microscope (10X) ne permet pas de voir. D'autre part, en continuant d'augmenter la tension appliquée jusqu'à 50V, les peignes se soudent l'un à l'autre. Dans certains cas, ce phénomène est irréversible et dans d'autres, réversible, permettant ainsi de réutiliser la structure pour d'autres tests.

Qualitativement, la caractérisation électrique a permis de voir que les peignes activés électrostatiquement contrôlaient le mouvement des ressorts et des murs de silicium. Il n'a pas été possible de calibrer la distance sur laquelle se déplacent les murs par rapport à la différence de potentiel appliquée aux actionneurs parce que l'instrumentation nécessaire n'était pas disponible (interféromètre à lumière blanche par exemple). Néanmoins, à partir des vidéos obtenues, et sachant que du fait du design la distance maximale sur laquelle les murs peuvent se déplacer est de 3,5 μm , le déplacement a été estimé à la moitié de cette distance soit 1,75 μm pour une tension appliquée de 45V. Les peignes mobiles semblent quant à eux se déplacer de 2,5 μm pour la même tension appliquée et le mouvement des ressorts qui les fixent au substrat est très notoire sur les observations vidéos.

4.3 Caractérisation optique

4.3.1 Analyse de la surface des miroirs

Avant de procéder à la caractérisation optique, les parois des miroirs fabriqués ont été observées à l'aide d'un microscope à force atomique afin de déterminer leur rugosité. Il est primordial que cette dernière soit aussi faible que possible afin de réduire au maximum la diffusion de la lumière incidente et donc minimiser les pertes.

La prise de mesure sur les parois verticales gravées par DRIE-ICP n'était pas une opération banale du fait de la configuration de l'appareil disponible et de la dimension des pointes. Il a donc fallu cliver aussi précisément que possible les échantillons et prendre la

mesure dans le haut des cavités, là où le scalloping est en général le plus prononcé.

Le pire cas de rugosité a donc été rencontré et cette partie ne correspond en principe pas à un endroit du miroir qui doit se retrouver en face du cœur de la fibre. La figure 4.5 suivante indique les sites sur lesquels les mesures de rugosité ont été effectuées.

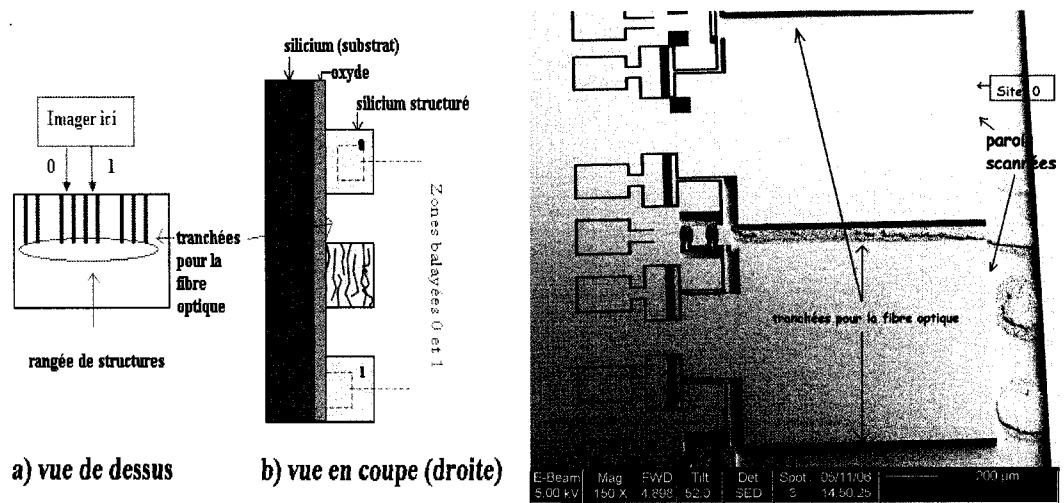


Figure 4.5 Sites des mesures AFM (schéma explicatifs des positions où les mesures AFM ont été effectuées et illustration de ces sites sur image SEM)

Sur la figure 4.5, à droite, sont illustrées les structures en vue de dessus avec les tranchées pour les fibres optiques visibles. Ainsi, pour prendre la mesure, les échantillons ont été clivés selon la ligne de coupe où toutes les tranchées destinées aux fibres se rejoignent. Cela a permis d'exposer les parois verticales telles qu'indiqué sur l'image SEM.

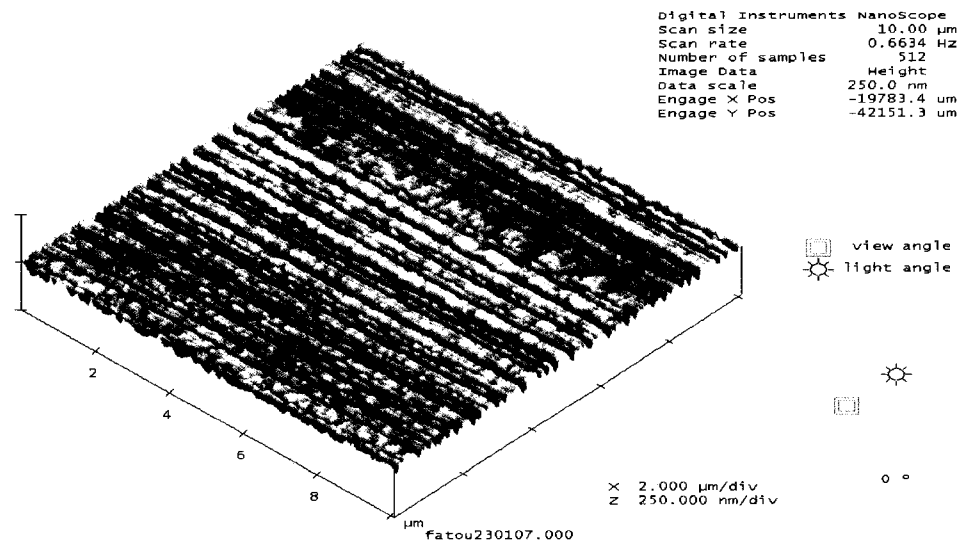


Figure 4.6 Schématisation 3D du balayage AFM des parois gravées (Site 0)

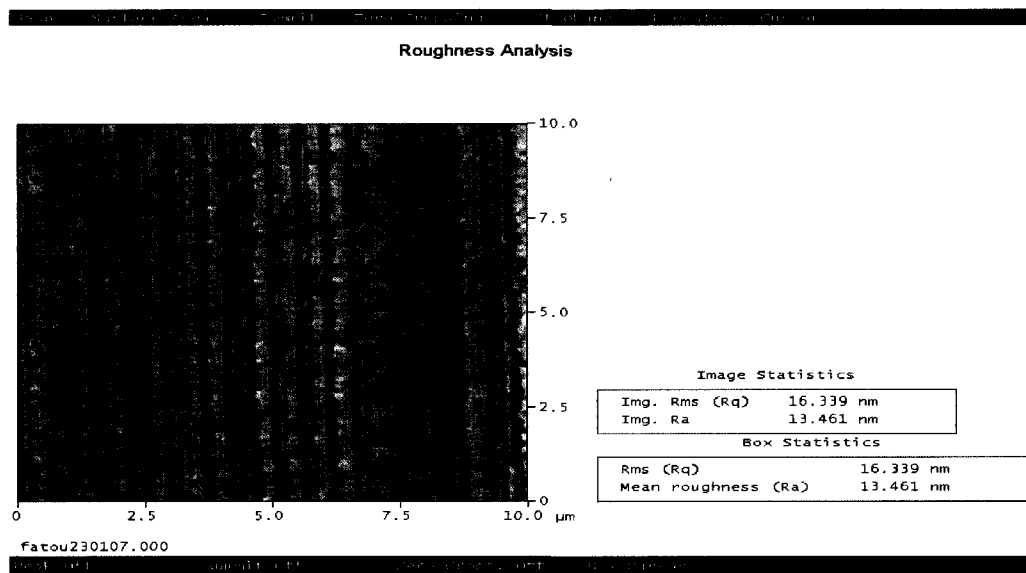


Figure 4.7 Analyse de rugosité par AFM sur les parois gravées (Site 0)

Les résultats obtenus pour l'analyse AFM des surfaces sont illustrés par les figures 4.6 et 4.7 pour le site 0 indiqué sur la figure 4.5. La première image correspond à une vue en 3D de la rugosité sur l'échantillon de surface scanné. Les rugosités observables sur ce schéma correspondent bien à ce qui était attendu du fait de l'effet de scalloping de la gravure DRIE. La figure 4.7 montre une vue 2D de la rugosité au même endroit et montre que les parois obtenues ont une rugosité RMS (root mean square) de 16 nm. D'autres

mesures ont été prises sur le site 1 indiqué sur la figure 4.5 et la rugosité obtenue était encore plus faible, à 12 nm RMS. Les images AFM présentées ci-dessus, malgré la faiblesse de rugosité mesurée, représentent le pire cas du fait de la gravure DRIE. En effet, lors de la gravure, les aires de plus grande ouverture se gravent plus vite car la circulation des espèces est facilitée (réactants et produits de réaction). Conséquemment, le « scalloping » est plus prononcé à ces endroits. La faible rugosité mesurée au niveau des « larges » ouvertures pour la fibre optique est donc très satisfaisante pour l'application visée car laisse présager une rugosité plus faible encore des miroirs (difficile à mesurer).

4.3.2 Description du montage

Le montage utilisé pour caractériser optiquement les structures obtenues a été réalisé par Sacha Bergeron dans le cadre de son projet de fin d'études (cf. figure 4.8).

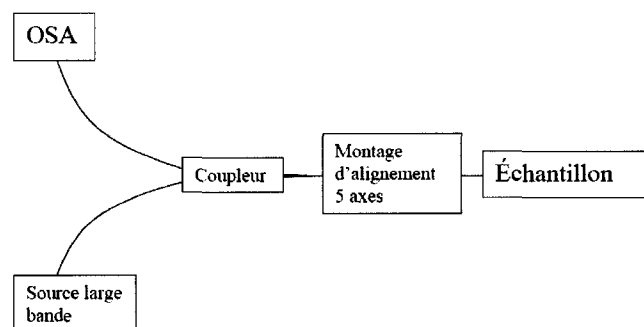


Figure 4.8 Schéma du montage de caractérisation optique

Celui-ci est constitué d'une source large bande connectée à un coupleur 2 x 1 qui amène la lumière aux structures disposées sur la plateforme d'alignement 5 axes. La lumière émise par la source passe ainsi par le coupleur avant d'arriver sur les structures. La réflexion résultante est récupérée dans la même fibre et repasse dans le coupleur pour être envoyé vers l'analyseur de spectre optique (OSA).

Le spectre de référence de la source est illustré à la figure 4.9 de la page suivante. Elle est composée de deux diodes aux émissions centrées à 1300 nm et 1550 nm mais seule

la diode à 1550 nm a été utilisée dans le cadre de cette caractérisation. Le spectre émis s'étend de 1450 nm à 1650 nm et la puissance mesurée est relativement faible avec un maximum de -38,2 dBm/nm à 1550 nm.

La caractérisation du coupleur utilisé dans ce montage a permis de déterminer une perte moyenne du système de 6,8 dB avec une variation de 0,3 dB, après un aller-retour. Ces pertes sont attribuables au coupleur mais aussi aux connecteurs, fibres fusionnées, etc. Il faut donc tenir compte de ces pertes dans les mesures en réflexion effectuées.

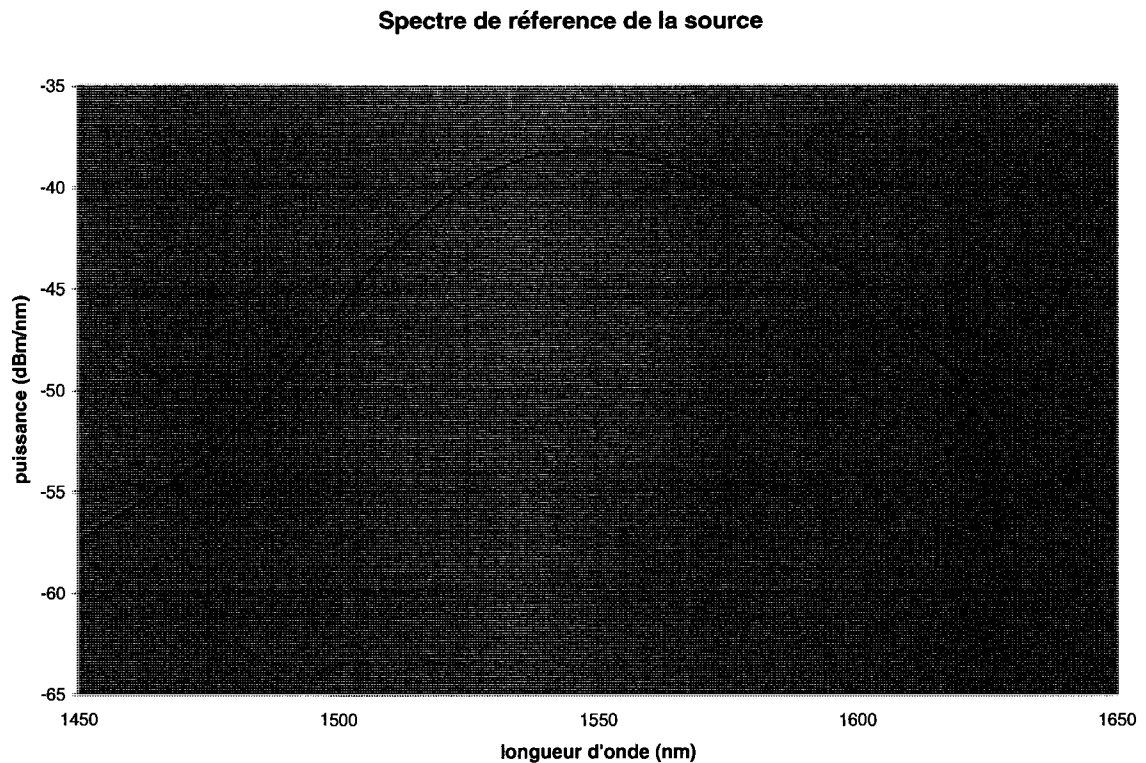


Figure 4.9 Spectre de référence de la source (diode à $\lambda=1550\text{nm}$)

4.3.3 Résultats et analyse

Les figures 4.10 à 4.13 représentent le spectre de réflexion mesuré sur quelques-unes des structures microfabriquées dans une tranche SOI de 70 μm (« device layer »). Ces structures ont été fabriquées pour avoir une réflexion maximale centrée à 1550 nm. De plus,

du fait de l'épaisseur des murs, le 101^{ème} ordre de réflexion pour le silicium est attendu, d'où la présence de bandes de réflexion de 20 nm de large.

Sur tous les spectres mesurés, la présence de plateaux de réflexion peut être notée. À 1550 nm, la réflexion est souvent dans ses valeurs maximales (pertes de 9 dB). Les pertes restent néanmoins élevées et les perturbations sont nombreuses. Les largeurs de bande obtenues sont en moyenne de 31 nm.

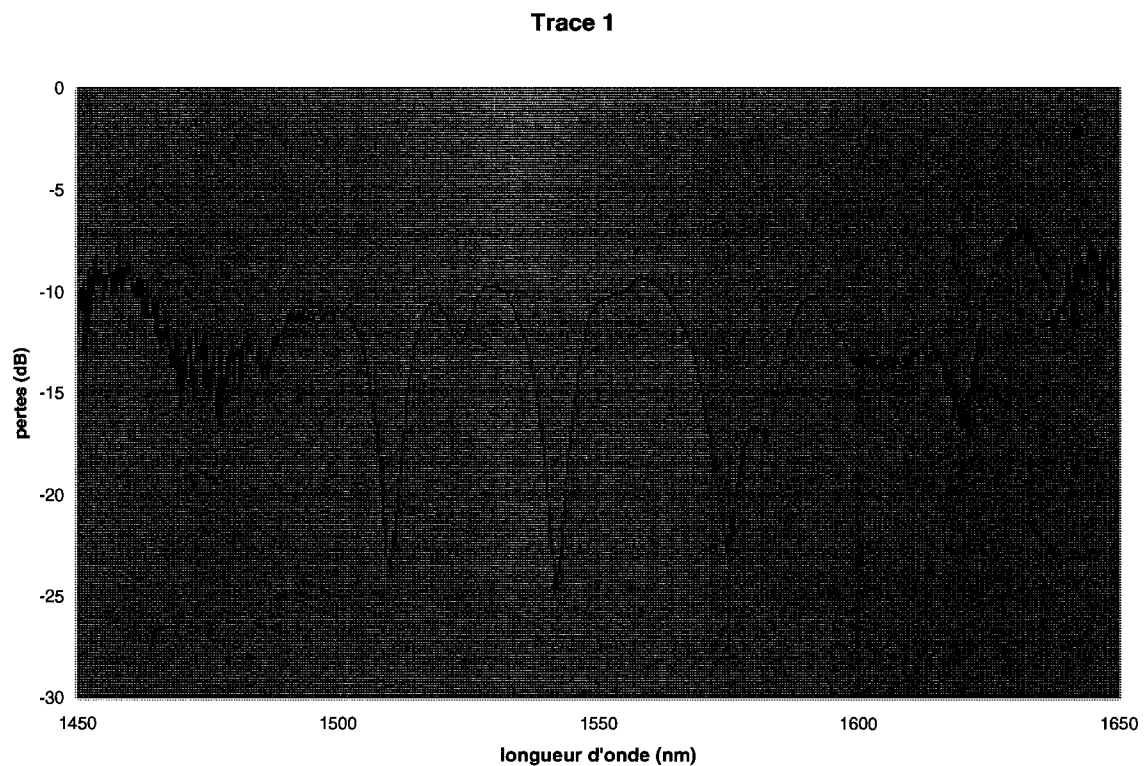


Figure 4.10 Spectre de réflexion de la structure fabriquée (première testée)

Le spectre de réflexion illustré par la courbe de la figure 4.10 comporte plusieurs « plateaux » de réflexion. Deux de ces plateaux sont particulièrement nets et se situent autour de 1525 nm et 1555 nm. Ils sont larges de 20 nm avec des pertes moyennes de 11 dB. Le pic de réflexion se situe à 1558 nm avec une perte de 9,3 dB. Cependant, les lobes latéraux ont aussi des réflectivités plutôt élevées ce qui perturbe considérablement le

filtrage de signal. Par ailleurs, des pics de pertes élevées (25 dB) sont observés à 1510, 1540 et 1575nm. Ces pics sont étroits et laissent envisager des propriétés intéressantes en transmission de la structure analysée à ces longueurs d'onde là.

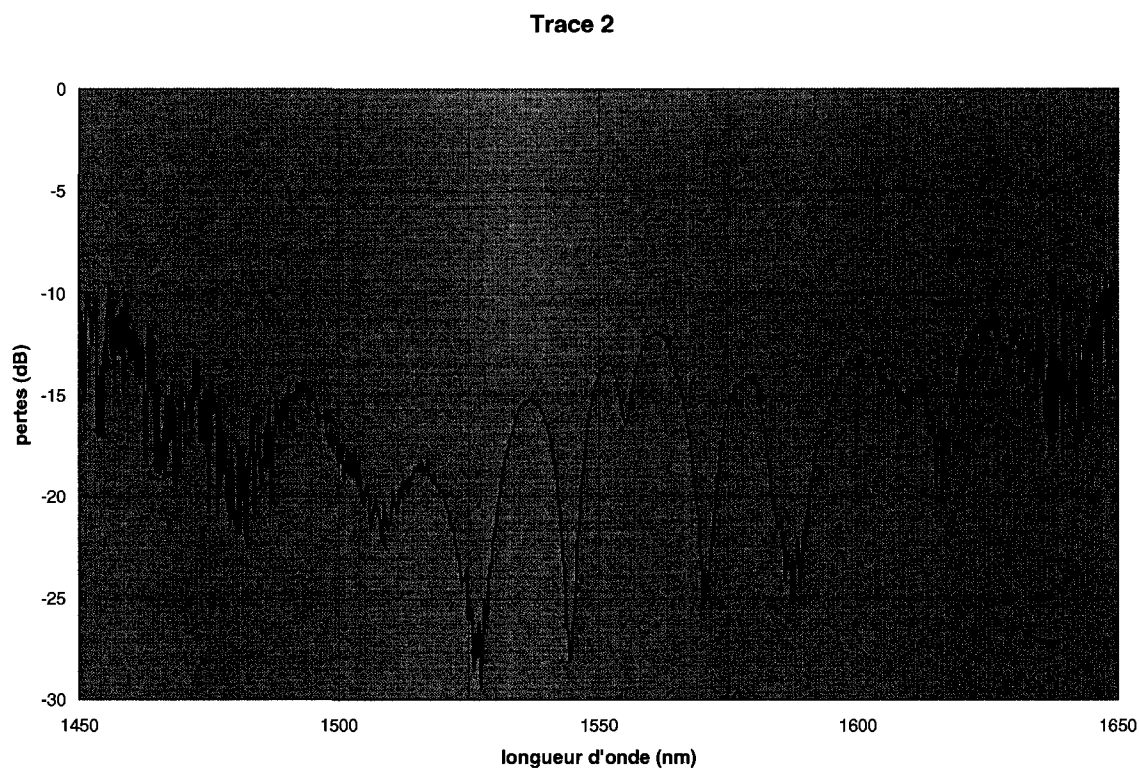


Figure 4.11 Spectre de réflexion de la structure fabriquée (deuxième testée)

Sur la figure 4.11, le spectre de réflexion mesuré comporte beaucoup de bruit aux longueurs d'onde en bordure de spectre. De plus, l'allure du spectre est semblable à ce qui a été obtenu précédemment, mais avec des lobes latéraux moindres comparativement aux bandes centrales de réflexion. Néanmoins, ces derniers ont aussi des pertes moyennes plus élevées de 15 dB. Le pic de réflexion se situe dans ce cas-ci à 1561 nm, avec une perte de 11,9 dB.

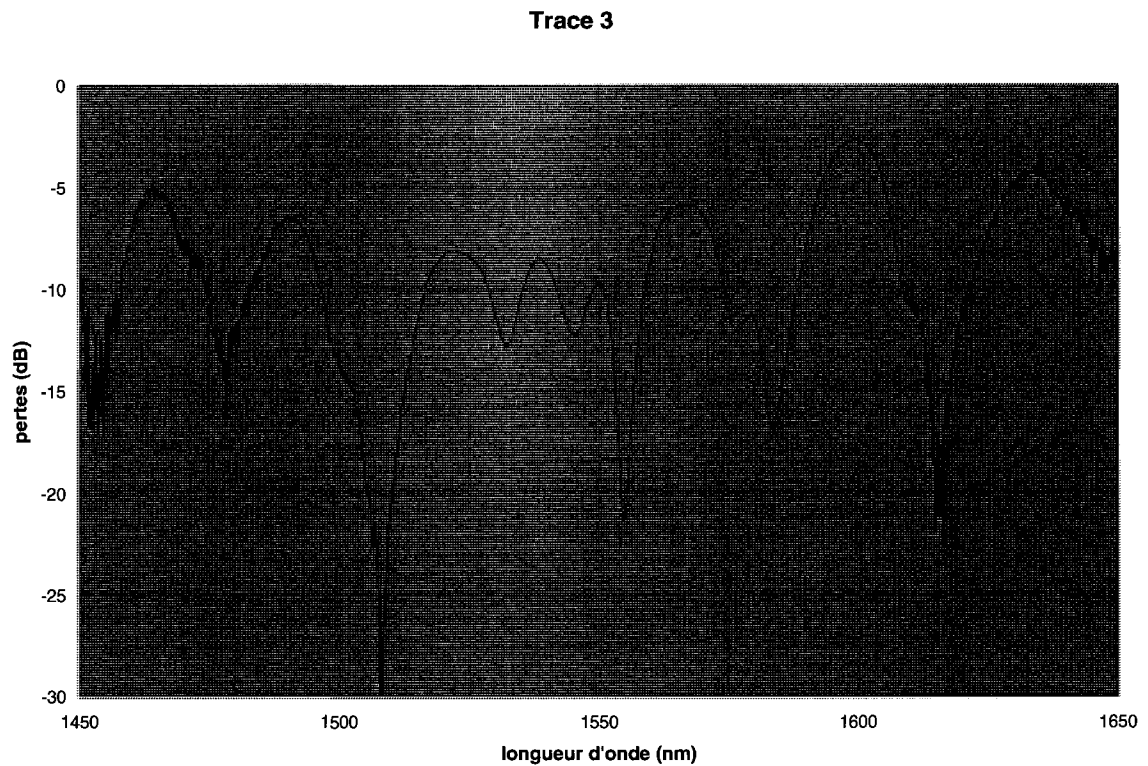


Figure 4.12 Spectre de réflexion de la structure fabriquée (troisième testée)

Le spectre de la figure 4.12 exhibe plusieurs plateaux très rapprochés de réflexion. L'un des principaux se situe entre 1563 nm et 1571 nm (6 dB en moyenne). Néanmoins, l'amplitude des bandes de réflexion environnantes ne permet pas de séparer réellement les longueurs d'onde. D'ailleurs, un pic de réflexion à 2,7 dB de pertes est obtenu à 1599 nm. Un pic de transmission à 1508 nm est aussi observable sur ce spectre (30 dB). Celui-ci est étroit et serait plus exploitable que les plateaux de réflexion, si l'actuation permettait de le translater dans le spectre à une valeur plus utilisable.

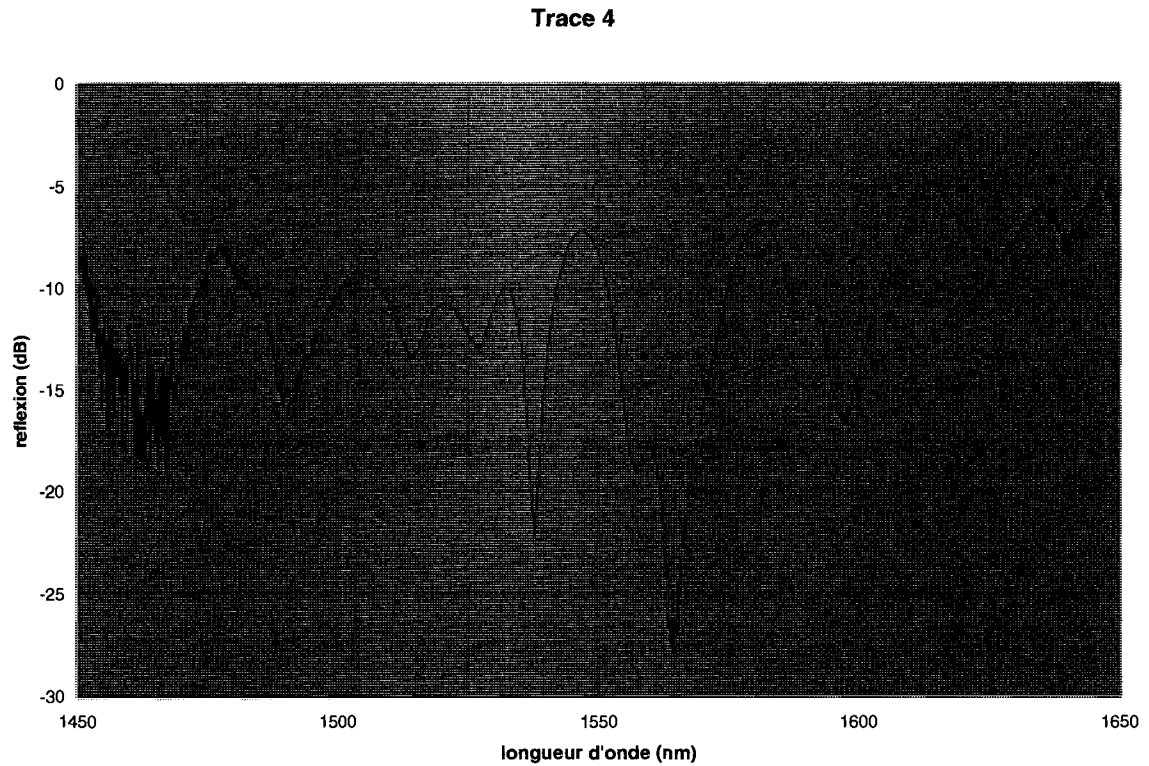


Figure 4.13 Spectre de réflexion de la structure fabriquée (quatrième testée)

Le spectre en 4.13 est plutôt similaire à ce qui a été observé sur la figure 4.12 précédente avec des lobes latéraux trop importants qui viennent perturber le filtrage. Cependant, la réflexion autour de 1550 nm est plus marquée cette fois-ci (7, 4 dB) et le plateau est plus étroit (moins d'une dizaine de nm). Encore là, un pic significatif en transmission est observé mais à 1564 nm au lieu 1508, avec une perte mesurée de 28 dB.

Les pertes importantes notées dans les dispositifs mesurés peuvent être attribuées à différents facteurs. Tout d'abord, la rugosité des murs est le premier facteur qui vient à l'esprit. Celle-ci est pourtant faible et une grande partie de l'optimisation du procédé de microfabrication a consisté à faire en sorte de réduire au maximum l'amplitude du « scalloping ». Néanmoins, la présence de ce phénomène est inhérente à la gravure DRIE-

ICP et des tests d'oxydation des parois suivie d'un bain de HF n'ont pas permis d'améliorer la situation de manière significative. Des expériences de lissage de parois par faisceau d'ions focalisés sont toutefois en cours et semblent donner des résultats très prometteurs [46].

Les pertes peuvent aussi être attribuées à un mauvais alignement de la fibre vis-à-vis des structures malgré l'utilisation de la table de positionnement car cela se fait sous un microscope et une grande précision et dextérité sont requises. En effet, les tranchées fabriquées à même le dispositif permettent d'emmener la fibre au filtre et facilitent l'alignement. Néanmoins, il n'y a pas de structures pour maintenir la fibre en place.

D'autre part, du fait de l'ouverture numérique de la fibre, les rayons n'arrivent pas incidence parfaitement normale sur les murs réflecteurs de Bragg, ce qui engendre aussi des pertes.

Par ailleurs, du fait de la nécessité de cliver les échantillons afin d'accéder aux structures, des débris de silicium viennent se déposer sur l'échantillon et peuvent ainsi venir se positionner entre la fibre et les structures et diffuser la lumière ou alors se retrouver entre les murs de silicium, brouillant ainsi complètement la réponse du système.

Quant à l'altération de la réponse de Bragg des structures, elle peut aussi être due au débris, mais aussi et surtout aux variations de dimensions causées par la fabrication. En effet, la précision dans les épaisseurs des couches est primordiale pour le respect de la condition de Bragg. Une variation dans les épaisseurs implique donc un déplacement de la bande centrale de réflexion. Dans le cas présent, les structures avaient été fabriquées pour avoir des réflexions centrées à 1500 nm; cependant, les mesures prises sur images SEM permettent de voir que les dimensions obtenues au final sont légèrement différentes des spécifications lors de la fabrication du masque (cf. figure 4.14, dimension des murs sur le masque : 10 μm). Il faudrait donc prévoir un biais de masque afin de compenser cet effet.

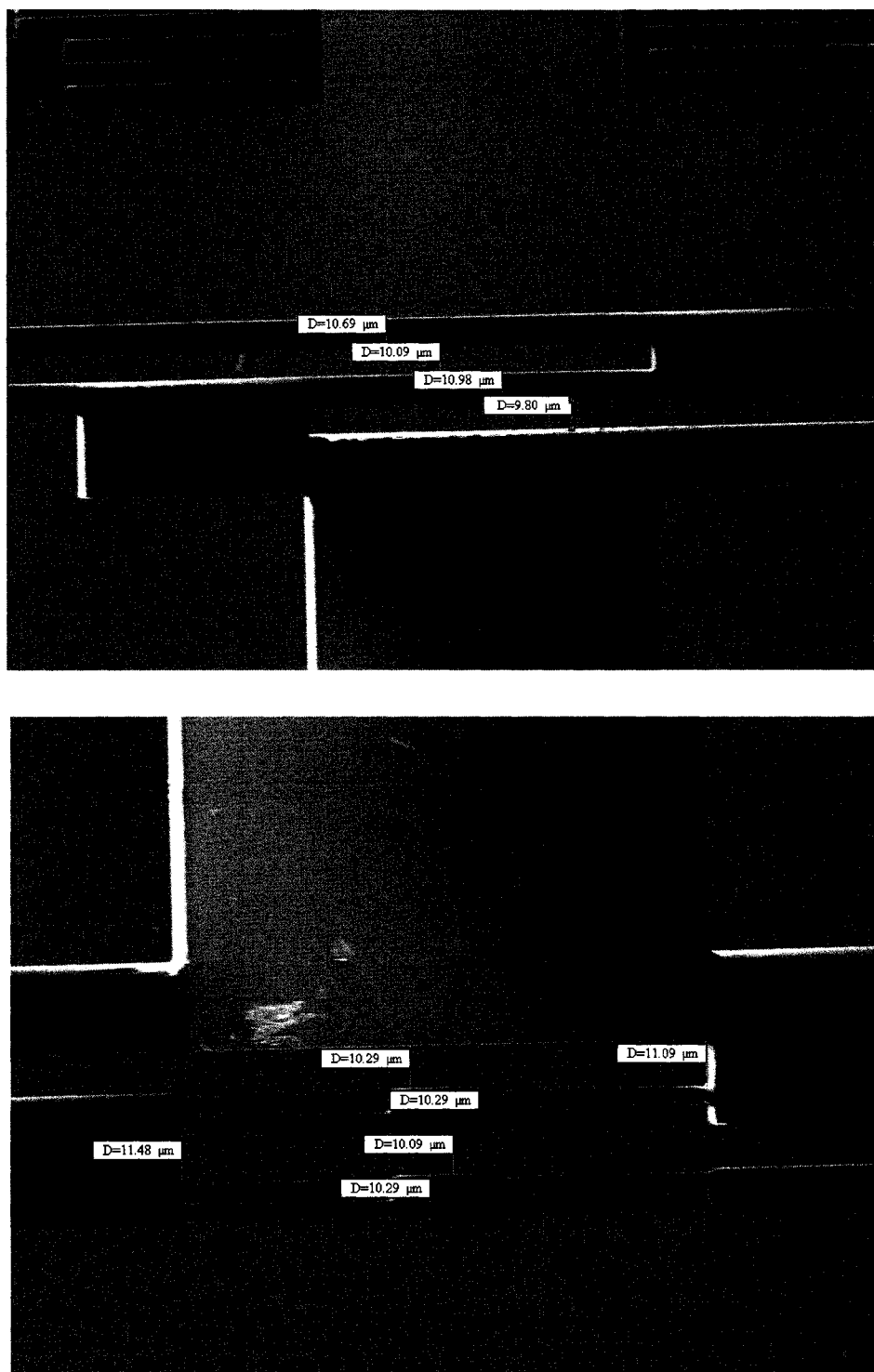


Figure 4.14 Dimensions mesurées au final sur les structures (sur image SEM)

CONCLUSION

Les structures à bande photonique interdite présentent des propriétés de filtrage impressionnantes, ce qui ouvre la voie à plusieurs applications dans le domaine des télécommunications optiques mais aussi dans les lasers ou les capteurs. La possibilité de contrôler et d'ajuster à volonté la bande interdite de ces composants optiques suscite beaucoup d'intérêt et l'intégration des cristaux photoniques avec les microsystèmes électromécaniques constitue un moyen fiable d'y parvenir. C'est ainsi que dans le cadre de ce travail, un microsystème opto-electro-mécanique a été conçu afin de parvenir à ce type de dispositif. La structure fabriquée est constituée d'un réseau de murs de Bragg en silicium, séparés par des espacements d'air, et individuellement contrôlés à l'aide de peignes électrostatiques interdigités. L'avantage des composantes externes de ce type repose dans la flexibilité qu'ils offrent, leur facilité d'intégration et d'alignement avec les fibres optiques, sans compter que celui-ci offre la possibilité unique de déplacer indépendamment chacun des réflecteurs. Les designs fabriqués dans le plan, avec leurs miroirs structurés verticalement dans le substrat constituent un défi important en terme de microfabrication. La majeure partie de ce travail a ainsi été consacrée à l'élaboration d'un procédé de fabrication efficace et robuste qui utilise de manière aussi simple que possible, les techniques de pointe utilisées dans l'industrie des microsystèmes. La méthode développée utilise la gravure profonde par ions réactifs (DRIE) sur un substrat de silicium sur isolant (SOI) pour définir les structures et les tranchées des fibres optiques en une seule et même étape. Des murs lisses et verticaux d'une rugosité RMS moyenne de 16nm ont été fabriqués avec cette méthode et ils ont pu être actionnés avec une tension minimum de 30 V.

Ce travail a permis de développer une importante expertise en microfabrication, plus particulièrement en gravure profonde, et de bâtir les bases pour la fabrication de filtres optiques accordables plus élaborés utilisant des miroirs de Bragg verticaux combinés pour faire un Fabry Péroต์ ultra flexible et facile à fabriquer et à actionner [47].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M.J.A. de Dood , E. Snoeks, A. Moroz and A. Polman, “Design and optimization of 2D-photonic crystal waveguides based on silicon”, *IEEE Opt. Quant. Elec.*, Vol 34, 145, 2002.
- [2] M. Qi, E. Lidorikis, P.T. Rakich, S.G. Johnson, J. D. Joannopoulos, E.P. Ippen, and H.I. Smith, “A three-dimensional optical photonic crystal with designed point defects”, *Nature*, Vol 429, 538-542, 2004.
- [3] R. Sawada, E. Higurashi, T. Ito and I. Ishikawa, “An accelerometer incorporating a laser microencoder for a wide measurable range”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol 136, 161-167, 2007.
- [4] S. E. Alper, K. Azgin and T. Akin, “A high-performance silicon-on-insulator MEMS gyroscope operating at atmospheric pressure”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol 135, 34-42, 2007.
- [5] G.C. Hill, R. Melamud, F.E. Declercq, A.A. Davenport, I.H. Chan, P.G. Hartwell and B.L. Pruitt, “SU-8 MEMS Fabry-Perot pressure sensor”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol 138, 52-62, 2007.
- [6] A. Dehé, “Silicon microphone development and application”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol 133, 283-287, 2007.
- [7] C.-H. Wang and G.-B. Lee, “Automatic bio-sampling chips integrated with micro-pumps and micro-valves for disease detection”, *Biosensors and Bioelectronics*, Vol 21, 419-425, 2005.
- [8] M. Tanaka, “An industrial and applied review of new MEMS devices features”, *Microelectronic Engineering*, Vol 84, 1341-1344, 2007.

- [9] T. Böhnke, M. Edoff and L. Stenmark, "Development of a MOEMS sun sensor for space applications", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol 130-131, 28-36, 2006.
- [10] M. Al-Aioubi, P.D. Prewett, S.E. Huq, V. Djakov and A.G. Michette, "Micro-opto-electro-mechanical system for X-ray focusing", *Microelectronic Engineering*, Vol 84, 1252-1255, 2007.
- [11] O. Levy, B.Z. Steinberg, A. Boag, S. Krylov and I. Goldfarb, "Mechanical tuning of two-dimensional photonic crystal cavity by micro Electro mechanical flexures", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol 139, 47-52, 2007.
- [12] C.F. R. Mateus, C.H. Chang, L. Chrostowski, S. Yang, D. Sun, R. Pathak, and C. J. Chang-Hasnain, "Widely Tunable Torsional Optical Filter", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol 14, 2002.
- [13] R. Le Dantec, T. Benyattou, G. Guillot, A. Spisser, C. Seassal, J. L. Leclercq, P. Viktorovitch, D. Rondi, and R. Blondeau, "Tunable Microcavity Based on InP–Air Bragg Mirrors", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol 5, 1999.
- [14] D. Hohlfeld, M. Epmeier, H. Zappe, "A thermally tunable, silicon-based optical filter", *Sensors and Actuators A*, Vol 103, 93-99, 2003.
- [15] Y. Yi, P. Bermel, K. Wada, X. Duan, J. D. Joannopoulos, and L. C. Kimerling, "Tunable multichannel optical filter based on silicon photonic band gap materials actuation", *Applied Physics Letters*, Vol 81, 2002.

- [16] R. Kashyap, "Photosensitive Optical Fibers: Devices and Applications", *Optical Fiber Technology*, Vol 1, 17-34, 1994.
- [17] S.-S. Yun and J.-H. Lee, "A micromachined in-plane tunable optical filter using the thermo-optic effect of crystalline silicon", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol 13, 721-725, 2003.
- [18] A. Lipson and E. M. Yeatman, "Low-loss one-dimensional photonic bandgap filter in (110) silicon", *Optics Letters*, Vol 31, 395-397, 2006.
- [19] J. Masson, S. Bergeron, A. Poulin, N. Godbout, and Y.-A. Peter, "Tunable Erbium Doped Fiber Laser Using a Silicon Micro-Electro-Mechanical Fabry-Perot Cavity," in *IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics*, Hualien, Taiwan, 171-172, 2007.
- [20] F.B. Kone and Y.-A. Peter, "Individually tunable silicon Bragg reflectors", *IEEE LEOS Optical MEMS Conference*, 2006.
- [21] C. Kittel, *Physique de l'état solide*, 7^{ème} édition, 1998.
- [22] S. Larouche and L. Martinu, "OpenFilters: open-source software for the design, optimization, and synthesis of optical filters", *Applied Optics*, Vol 47, C219-C230, 2008.
- [23] S. Weidong, L. Xiangdong, H. Biqin, Z. Yong, L. Xu, G. Peifu, "Analysis on the tunable optical properties of MOEMS filter based on Fabry-Perot Cavity," *Optics Communications*, Vol 239, 153-160, 2004.

- [24] Y.-A. Peter, F.B. Kone, J. Masson and N. Godbout, "Tunable micro-electromechanical grating in silicon," (invited paper) in *SPIE Optomechatronic Micro/Nano Devices and Components II*, Optics East Conference, 2006.
- [25] D. R. Anderson, L. Johnson, F. G. Bell, "Fundamentals of fiber optics" *Troubleshooting Optical Fiber Networks*, 2nd edition, 13-58, 2004.
- [26] Y-A Peter, Notes de cours PHS-4311 Microsystèmes.
- [27] Y. Zhao and T. Cui, "Fabrication of high-aspect-ratio polymer-based electrostatic comb drives using the hot embossing technique", *J. Micromech. Microeng.*, Vol 13, 430-435, 2003.
- [28] T. Fresvig, P. Ludvigsen, H. Steen and O. Reikerås, "Fibre optic Bragg grating sensors: An alternative method to strain gauges for measuring deformation in bone", *Medical Engineering & Physics*, Vol 30, 104-108, 2008.
- [29] X. Liu, "A novel ultra-narrow transmission-band fiber Bragg grating and its application in a single-longitudinal-mode fiber laser with improved efficiency", *Optics Communications*, Vol 280, 147-152, 2007.
- [30] X. Ni, Y. Zhao and J. Yang, "Research of a novel fiber Bragg grating underwater acoustic sensor", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol 138, 76-80, 2007.
- [31] P. Pérez-Millán, A. Wiberg, P. O. Hedekvist, P. A. Andrekson and M. V. Andrés, "Optical demultiplexing of millimeter-wave subcarriers for wireless channel distribution employing dual wavelength FBGs", *Optics Communications*, Vol 275, 335-343, 2007.

- [32] J. Bures, Notes de cours PHS-6209 Technologie de l'optique guidée.
- [33] A. Othonos, K. Kalli, Fiber Bragg Gratings - Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing, 2001.
- [34] Y. J. Rao, "Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors" Optics and Lasers in Engineering, Vol 31, 297-324, 1999.
- [35] P.S. Andre, L. Pinto, I. Abe, H.J. Kalinowski, O. Frazao, F. M. Araujo, "Fiber Bragg Gratings for Telecommunications Applications: Tunable Thermally Stress Enhanced OADM", *Journal of Microwaves and Optoelectronics*, Vol 2, 2001.
- [36] T. Inui, T. Komukai, M. Nakazawa, "Highly efficient tunable fiber Bragg grating filters using multilayer piezoelectric transducers", *Optics Communications*, Vol 190, 1-4, 2001.
- [37] Iocco et al., "Bragg grating fast tunable filter for wavelength division multiplexing", *J. Lightwave Technology*, Vol 17, 1217-1221, 1999.
- [38] S. Pamidighantam et al., "Pull-in voltage analysis of electrostatically actuated beam structures with fixed-fixed and fixed-free end conditions", *J. Micromech. Microeng.*, Vol 12, 458-464, 2002.
- [39] C. Marxer, C. Thio, M. A. Gretillat, N.F. de Rooij, R. Battig, B. V. Anthamatten and P. Vogel, "Vertical mirrors fabricated by deep reactive ion etching for fiber optic switching applications", *J. Microelectromech. Syst.*, Vol 6, 277-284, 1997.
- [40] http://en.wikipedia.org/wiki/Piranha_solution

- [41] Jansen et al, “A survey on the reactive ion etching of silicon in microtechnology”, *J. Micromech. Microeng.*, Vol 6, 14–28, 1996.
- [42] <http://www.siliconresources.com/AP010.html>
- [43] <http://www.oxinst.com>
- [44] <http://www.idonus.com/>
- [45] http://www.2spi.com/catalog/instruments/dryers_technique.html
- [46] I.-H. Song, Y.-A. Peter and M. Meunier, “Smoothing dry etched microstructure sidewalls using focused ion beam milling for optical applications”, *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 17, 1593-1597, 2007.
- [47] J. Masson, F. B. Koné and Y.-A. Peter, “MEMS Tunable Silicon Fabry-Pérot Cavity”, in *SPIE Optomechatronic Micro/Nano Devices and Components III*, Lausanne, Switzerland, vol. 6717, paper 05, SPIE, 2007.

ANNEXES

Annexe 1 : Comparaison des différents réseaux de Bragg présentés

Tableau A1.1 Comparaison des différents réseaux de Bragg présentés

Comparaison de différents types de réseaux de Bragg			
Type de réseau	Fabrication	Avantages	Inconvénients
Réseau fibré	Inscription laser à même la fibre	Directement intégré à la fibre précis	Difficilement accordable
Empilement diélectrique	Multiples dépôts de couches minces	Excellentes réflectivités	Pertes d'alignement Fabrication difficile
Réseau vertical	Gravure profonde du silicium	Intégration facilitée	Fabrication complexe Pas accordable
Dispositif suggéré	Procédé développé	Intégration compacité Flexibilité	À voir ☺

Annexe 2 : HEXAMETHYLDISILANE**Product Properties:**

Structural Formula $(\text{CH}_3)_3\text{SiNHSi}(\text{CH}_3)_3$

Molecular Weight 161.4

Boiling Point 126-127°C

Density (20°C) 0.774

Refractive Index (20°C) 1.4080

Viscosity 0.90 cSt

Vapor Pressure (50°C) 79 torr

Flash Point 13°C(55°F)

Product Specifications:

Purity 99.0% min

Residue 5 ppm max.

Color (APHA) 10 max.

Chloride 1.0 ppm max.

Metal Analysis <10 ppb

(Al, B, Ca, Cr, Cu, Fe, Pb, Li, Mg, Ni

K, Na, Sn, Ti, Zn)

Annexe 3 : Fiche signalétique de la SP1813

**SHIPLEY**

**MICROPOSIT®
S1800® SERIES
PHOTO RESISTS**

MICROPOSIT S1800 SERIES PHOTO RESISTS are positive photoresist systems engineered to satisfy the microelectronics industry's requirements for advanced IC device fabrication. The system has been engineered using a toxicologically safer alternative casting solvent to the ethylene glycol derived ether acetates. The dyed photoresist versions are recommended to minimize notching and maintain linewidth control when processing on highly reflective substrates.

**MICROPOSIT S1800 SERIES PHOTO RESISTS
FEATURE:**

Product Assurance

- Lot-to-lot consistency through state-of-the-art physical, chemical and functional testing
- Filtered to 0.2 µm absolute

Coating Properties

- ¹Cellosolve® Acetate and xylene free
- Striation-free coatings
- Excellent adhesion
- Excellent coating uniformity
- A variety of standard viscosities are available for single-layer processing

Exposure Properties

- Optimized for G-Line exposure
- Effective for broad-band exposure
- Reflective notch and linewidth control using dyed versions

Develop Properties

- Optimized for use with the MICROPOSIT® MF®-319 Metal-Ion-Free DEVELOPER family
- Compatible with Metal-Ion-Bearing MICROPOSIT DEVELOPERS

Removal Property

- Residue-free photoresist removal using standard MICROPOSIT REMOVERS



0.80 µm Lines/Spaces



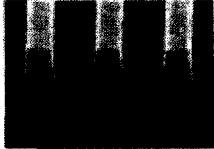
0.70 µm Lines/Spaces



0.60 µm Lines/Spaces



0.50 µm Lines/Spaces



0.48 µm Lines/Spaces

Masking Linearity SEMS
Figure 1.

High Resolution Process Parameters (Refer to Figure 1)	
Substrate	Polysilicon
Photoresist	MICROPOSIT®S1813® PHOTO RESIST
Coat	12,300Å
Solvent	115°C/60 sec. Hotplate
Exposure	Nikon 1505 G&E G-Line (0.54 NA) 150 mJ/cm²
Develop	MICROPOSIT® MF®-321 DEVELOPER 15 + 50 sec. Double Spray Puddle (DSP) @ 21°C

Registered trademark of Union Carbide Corporation

SPR 1-1988
1992

Instructions for Use

The following instructions cover the use of MICROPOSIT S1800 SERIES PHOTO RESISTS for all levels of microelectronic device fabrication. Exact process parameters are application and equipment dependant.

Substrate Preparation

MICROPOSIT S1800 SERIES PHOTO RESISTS work well with the hexamethyldisilazane based MICROPOSIT PRIMERS. Concentrated MICROPOSIT PRIMER is recommended when vacuum vapor priming. Diluted PRIMER is recommended for liquid phase priming applications.

Coat

MICROPOSIT S1800 SERIES PHOTO RESISTS provide uniform defect-free coatings over a wide range of film thicknesses. The film thickness versus spin speed plots displayed in Figures 1 and 2 provide the information required to properly select a MICROPOSIT S1800 PHOTO RESIST version to meet process dependent thickness specifications. Maximum coating uniformity is typically attained between the spin speeds of 3500 rpm and 5600 rpm.

Process Parameters (Refer to Figures 1 and 2)	
Substrate	Silicon
Coat	SVG 61
Softbake	115°C/60 seconds Hotplate
Measure	Nanometrics 210

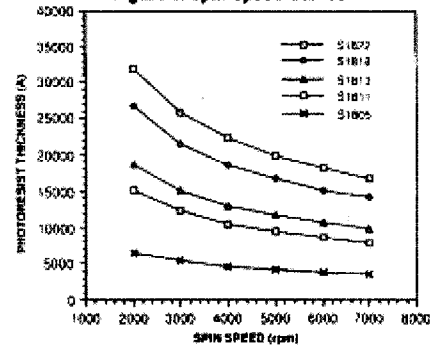
The dispersion curve and Cauchy equation displayed in Figure 3 describe how the refractive index of the photoresist film varies as a function of the wavelength of light incident upon the film. This information is required to program ellipsometric and other optically based photoresist measuring equipment.

Process Parameters (Refer to Figure 3)	
Substrate	Silicon
Coat	13,675Å
Softbake	115°C/60 seconds Hotplate
Measure	Prometrix SM300

Page 2

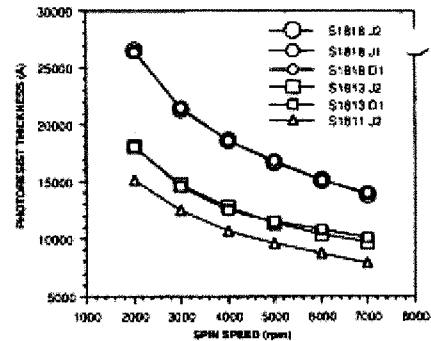
MICROPOSIT S1800 PHOTO RESIST UNDYED SERIES

Figure 1. Spin Speed Curves



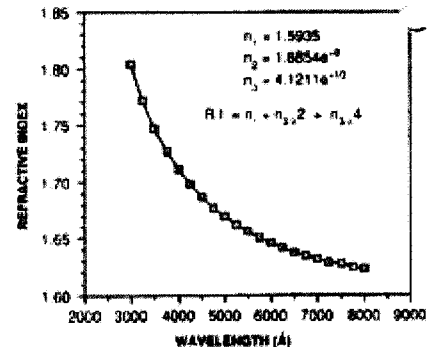
MICROPOSIT S1800 PHOTO RESIST DYED SERIES

Figure 2. Spin Speed Curves



MICROPOSIT S1813 PHOTO RESIST

Figure 3. Dispersion Curve



Exposure

Proper film thickness selection is critical in order to reduce photospeed and critical dimension variability. The interference curves displayed in Figure 4 illustrate the photospeed variability as a function of film thickness. Dyed versions suppress the interference effects which are more pronounced when exposing with monochromatic light sources and when using reflective substrates.

Process Parameters (Refer to Figure 4)	
Substrate	Silicon
Coat	GCA 1006 ² WAFERTRAC [®]
Softbake	115°C/60 seconds Hotplate
Expose	GCA 8500 G-Line (0.35 NA)
Developer	MF-321 /10 + 30 DSP @ 21°C

MICROPOSIT S1800 SERIES PHOTO RESISTS can be exposed with light sources in the spectral output range of 350 nm -450 nm. The exposure properties have been optimized for use at 436 nm. Figures 5 and 6 show the absorbance spectra for MICROPOSIT S1813 and S1813 J2[®] PHOTO RESISTS.

Process Parameters (Refer to Figures 5 and 6)	
Substrate	Quartz
Coat	12,300Å
Softbake	115°C/60 seconds Hotplate
Expose	Oriel Scanning Wedge
Measure	Hewlett Packard 8450A Spectrophotometer

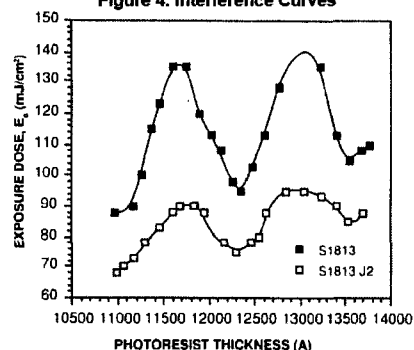
Table 1 summarizes the Dill parameters for each MICROPOSIT S1800 SERIES PHOTO RESIST version. Dill parameters are used in optical exposure models such as SAMPLE and PROLITH.

MICROPOSIT S1800 SERIES PHOTO RESISTS
Table 1. Dill Parameters

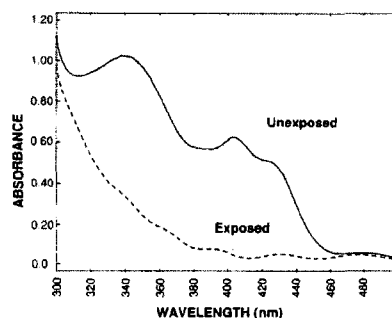
Photoresist	365 nm		436 nm	
	A (μm^{-1})	B (μm^{-1})	A (μm^{-1})	B (μm^{-1})
S1813	1.07	0.31	0.61	0.08
S1813 D1	1.05	0.34	0.58	0.26
S1811 J2	1.07	0.49	0.59	0.61
S1818 J1	1.06	0.42	0.57	0.37

² Registered Trademark of GCA, a unit of General Signal

MICROPOSIT S1813 and S1813 J2 PHOTO RESISTS
Figure 4. Interference Curves



MICROPOSIT S1813 PHOTO RESIST
Figure 5. Absorbance Spectrum



MICROPOSIT S1813 J2 PHOTO RESIST
Figure 6. Absorbance Spectrum

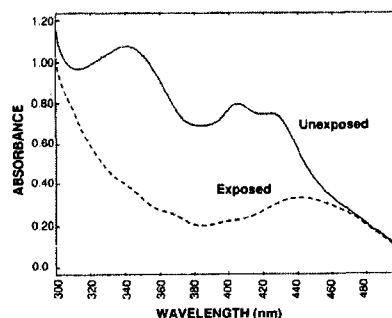


Figure 7 displays a contrast curve for MICROPOSIT S1813 PHOTO RESIST developed with MICROPOSIT MF-321 DEVELOPER. In general, high contrast values correlate to higher angle wall profiles.

Process Parameters (Refer to Figure 7)	
Substrate	Silicon
Coat	12,300Å
Softbake	115°C/60 seconds Hotplate
Expose	GCA 8500 G-Line (0.35 NA)
Develop	MF-321 /10 + 30 DSP @ 21°C

DEVELOP

MICROPOSIT S1800 SERIES PHOTO RESISTS are compatible with both Metal-Ion-Free (MIF) and Metal-Ion-Bearing (MIB) developers. A photoresist and developer system is dependent upon specific application requirements. Contact your local Shipley Technical Sales Representative for additional product information.

Figures 8 thru 10 illustrate the lithographic functionality of MICROPOSIT S1813 PHOTO RESIST using process parameters designed to maximize resolution while maintaining excellent exposure and focus latitude (refer to SEM photographs in Figure 1). The functional lithographic responses are summarized in Table 2.

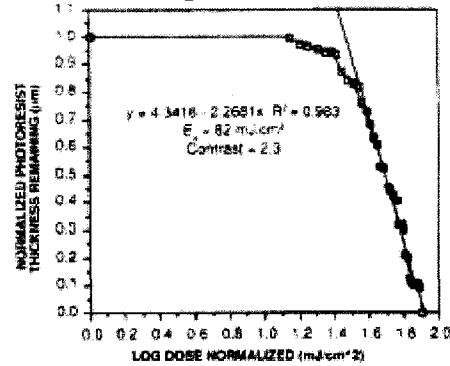
Process Parameters (Refer to Figures 8 thru 10)	
Substrate	Silicon
Coat	12,300Å
Softbake	115°C/60 seconds Hotplate
Expose	Nikon 1505 G8E G-Line (0.54 NA)
Develop	MF-321 /15 + 60 DSP @ 21°C

MICROPOSIT S1813 PHOTO RESIST
with MICROPOSIT MF-321 DEVELOPER
Table 2. Functional Lithographic Summary Data

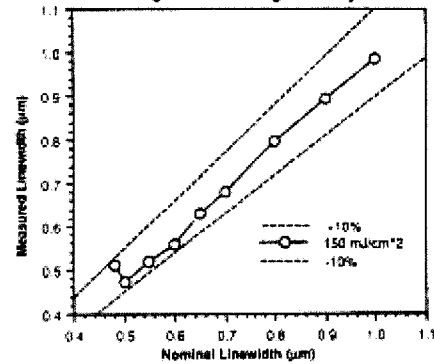
Sizing Energy	150 mJ/cm ² (1.3 E ₀)	
Resolution	0.48 µm	
Masking Linearity (±10% CD)	0.50 µm	
	1.0µm L/S	0.60 µm L/S
Exposure Latitude (±10% CD)	65%	45%
Focus Latitude (±10% CD)	2.25 µm	1.25 µm
≥ 85° Wall Angle		

Page 4

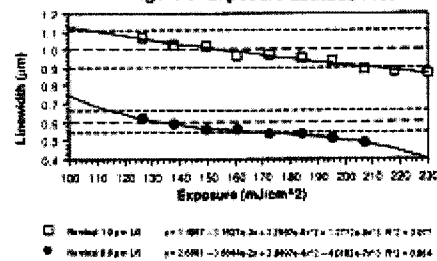
MICROPOSIT S1813 PHOTO RESIST
Figure 7. Contrast Curve



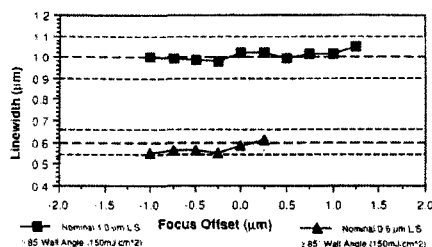
MICROPOSIT S1813 PHOTO RESIST
Figure 8. Masking Linearity Plot



MICROPOSIT S1813 PHOTO RESIST
Figure 9. Exposure Latitude Plot



MICROPOSIT S1813 PHOTO RESIST
Figure 10. Focus Latitude Plot



Handling Precautions

WARNING: MICROPOSIT S1800 SERIES PHOTO RESISTS are combustible mixtures containing propylene glycol monomethyl ether acetate. Contact with eyes, skin and mucous membranes causes irritation. Handle with care. Do not get in eyes, on skin or on clothing. Avoid breathing vapors or mists. Use with adequate ventilation. Wash thoroughly after handling.

Wear chemical goggles, chemical gloves and suitable protective clothing when handling MICROPOSIT S1800 SERIES PHOTO RESISTS.

In case of eye or skin contact, flush affected areas with plenty of water for at least 15 minutes. Then contact a physician at once.

Consult product Material Safety Data Sheet before using.

Toxicological and Health Advantages

The solvent used in MICROPOSIT S1800 SERIES PHOTO RESISTS is propylene glycol monomethyl ether acetate. Toxicological studies reported that propylene glycol derivatives contained in MICROPOSIT S1800 SERIES PHOTO RESISTS do not demonstrate the adverse blood effects and reproductive effects that ethylene glycol derived ether acetates demonstrate (NIOSH Current Intelligence Bulletin 9 -5/2/83).

Storage

Store MICROPOSIT S1800 PHOTO RESISTS only in upright, original containers in a dry area at 50°-70°F (10°-21°C). Store away from light, oxidants, heat, and sources of ignition. Do not store in sunlight. Keep container sealed when not in use.

Equipment

MICROPOSIT S1800 SERIES PHOTO RESISTS are compatible with most commercially available photo-resist processing equipment. Compatible materials include stainless steel, glass, ceramic, unfilled polypropylene, high density polyethylene, polytetrafluoroethylene, or equivalent materials.

Technical Literature

Please contact your Shipley Technical Sales Representative for information on the use and performance of Shipley products.

Annexe 4 : Paramètres utilisés pour l'application de la SP1813

Tableau A4.1 Paramètres de la recette de photolithographie avec la SP 1813

Étape	Produit utilisé	Paramètres
Étalement promoteur d'adhérence	HMDS	Étalé par tournette 40s à 4000 rpm
Étalement de la résine	Microposit® SP 1813®	Étalée par tournette 40s à 4000 rpm
Recuit de la résine (softbake)		115°C durant 60 secondes
Développement de la résine	Développeur MF 319	60 secondes par immersion avec agitation

Annexe 5 : Fiche signalétique de la SPR 220



ELECTRONIC MATERIALS
MICROELECTRONIC TECHNOLOGIES

MEGAPOSIT™ SPR™ 220 SERIES PHOTORESISTS

For i-Line Applications

DESCRIPTION

SPR220 i-Line photoresist is a general-purpose, multi-wavelength resist designed to cover a wide range of film thicknesses, 1–30 μm , with a single-coat process. SPR220 also has excellent adhesion and plating characteristics, which make it ideal for such thick film applications as MEMs and bump processes.

ADVANTAGES

- Broadband, g-Line and i-Line capable
- >10 μm film thickness in a single coat with good uniformity
- Fast photospeed: 210 mJ/cm^2 for 1.1 μm lines/spaces @ 4.0 μm film thickness (i-Line)
- Excellent wet and dry etch adhesion
- Au, Cu and Ni/Fe plating without cracking
- MIF and MIB developer compatible

See Table 1 for recommended process conditions and Figure 1 for various applications.

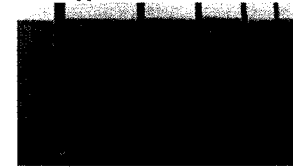
Table 1. Recommended Process Conditions		
	1.1–4.0 μm Thickness*	4.0–10.0 μm Thickness*
Thickness	1.1–4.0 μm	4.0–10.0 μm
Softbake	115°C/90 sec. Contact Hotplate	30 sec. step-down to 115°C/90 sec. Contact Hotplate ^{***}
Expose	ASML PAS 5500/200 i-Line (0.48 NA, 0.50 σ)	
PEB	115°C/90 sec. Contact Hotplate	
Developer	MF™-24A @ 21°C, 60 sec. single spray puddle	

*Recommended for isolated spaces as well.

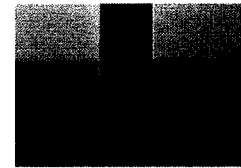
**Refer to softbake section for further details.

All data shown within this flyer used the process conditions listed above unless otherwise stated.

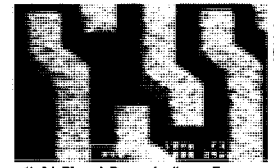
Figure 1. Various Applications



Etched Trenches (Bosh Process)
4–10 μm Features (up to 100 μm deep)



Wet Water Etch (1:5 HF 5 min.): 2 μm Feature



Gold Plated Deposit: 5 μm Features

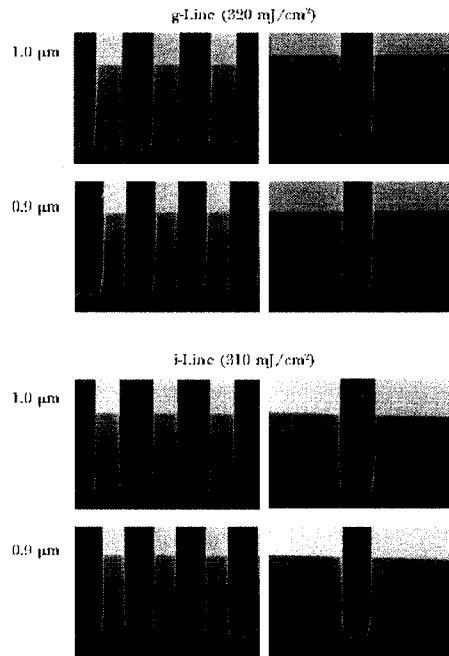
Table 2. Photospeed and Linearity of Dense Lines/Spaces at Various Thicknesses

	Film Thickness	Photospeed*	Linearity
g-Line	1.2 μm	210 mJ/cm^2	0.65 μm
g-Line	3.0 μm	320 mJ/cm^2	0.90 μm
g-Line	7.0 μm	470 mJ/cm^2	1.80 μm
i-Line	1.2 μm	160 mJ/cm^2	0.45 μm
i-Line	3.0 μm	310 mJ/cm^2	0.90 μm
i-Line	5.0 μm	380 mJ/cm^2	0.90 μm

*See Table 6 for recommended develop conditions.

MEGAPOSIT SPR 220 SERIES PHOTORESIST

Figure 2. Resolution at 3.0 μm Film Thickness



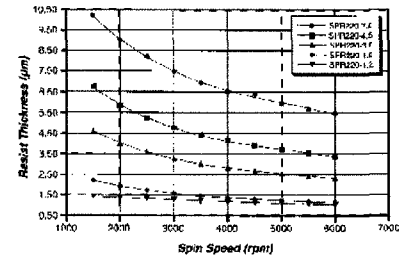
SUBSTRATE

SPR220 is compatible with a wide range of substrates, including but not limited to silicon, aluminum oxide, gold, copper and nickel-iron. A hexamethyldisilazane (HMDS)-based MICROPOSIT[®] primer is recommended to promote adhesion with substrates that require such treatment. Vacuum vapor priming at 120°C for 30 seconds with concentrated HMDS is recommended.

COAT

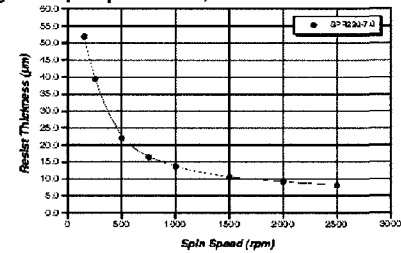
Figure 3 shows the relation between spin speed and resist thickness for 4-inch substrates. Figure 4 shows the relationship between spin speed and resist thickness for 8-inch (200 mm) substrates applying SPR220-7.0. Based on this curve a 375 RPM spin will yield a film thickness of approximately 30 μm . Nominal film thickness may vary slightly due to process, equipment and ambient conditions.

Figure 3. Spin Speed Curves on 4"



Coat Uniformity @ 7.31 μm , standard deviation = 0.036 μm , (33 points)

Figure 4. Spin Speed Curve, SPR220-7.0 on 8"



SOFTBAKE

The recommended softbake process for SPR220 for films up to 4.0 μm is 115°C for 90 seconds on a contact hotplate. For films greater than 4.0 μm , use a 30 second ramp in temperature (step-down to hotplate) to 115°C and hold for a minimum of 90 seconds. For film thickness greater than 12 μm , apply a 30 second ramp in temperature (step-down to hotplate) to 115°C and hold for a minimum of 300 seconds.

FILM THICKNESS MEASUREMENT

Figure 5 (see next page) shows the refractive index of SPR220 as a function of wavelength. Cauchy coefficients are listed in Table 3. Refractive index and dill parameters are listed in Table 4 and Table 5, respectively (see next page for these tables).

For film thickness greater than 12 μm the resist is exposed to an energy dose between 700 and 1,300 mJ/cm^2 (measured using standard radiometer @ 365 nm wavelength) using a high energy light source that generates peak output of wavelengths between 350 to 400 nm. Coating uniformity and the applied soft bake parameters can affect the required exposure energy needed for standardization and determination of the optimized exposure.



MEGAPOSIT SPR 220 SERIES PHOTORESIST

Figure 5. Dispersion Curve

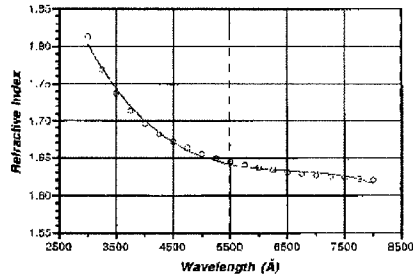


Table 3. Cauchy Coefficients

n_1	1.6035
n_2	9.7122×10^5
n_3	8.2082×10^{12}

Table 4. Refractive Index

RI @ 365 nm	1.73
RI @ 405 nm	1.30
RI @ 436 nm	1.67
RI @ 633 nm	1.63

Table 5. Dill Parameters

	365 nm	405 nm	436 nm
Dill A	0.5250	0.7075	0.4242
Dill B	0.0298	0.0173	0.0150

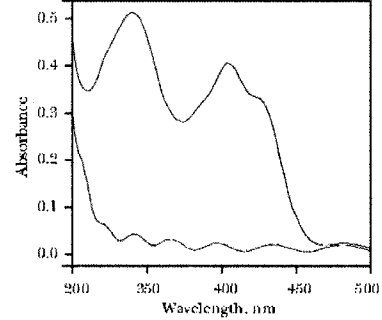
EXPOSE

The absorbance curves for the unexposed and exposed resist film are shown in Figure 6.

POST-EXPOSURE BAKE

Post-exposure bake (PEB) is run at the same temperature as the softbake. With thicker films (above 4 μm), a hold time is used between exposure and PEB to allow water (which is necessary to complete the photo-reaction) to diffuse back into the photoresist film. Thick films should use a minimum hold time of 35 minutes. For film thickness greater than 12 μm requires a minimum hold time of 120 minutes between exposure and develop should be applied.

Figure 6. Absorbance Curves



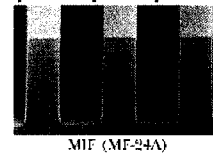
DEVELOP

SPR220 is optimized for 0.24N developers. Thicker films or high-throughput processes can utilize 0.26N developers. SPR220 has also been formulated for use in metal-ion free and metal-ion bearing developers, as demonstrated in Figure 7. See Table 6 for recommended develop conditions.

Table 6. Recommended Develop Conditions

	1.2 μm FT	3.0 μm FT	5.0 μm FT	7.0 μm FT
MF-24A	40 sec. SP	60 sec. SP	60/60 sec. DP	60/60 sec. DP
MF-26A	40 sec. SP	60 sec. SP	80 sec. SP	60/60 sec. DP
M452	—	3 min. Imm.	3 min. Imm.	3 min. Imm.
M453	—	—	3 min. Imm.	3 min. Imm.

Figure 7. Developer Compatibility



For thick film application 12 μm or greater using MF-26A developer, the overall development time will behave similar to the thin film time cited in the table Figure 7 above.

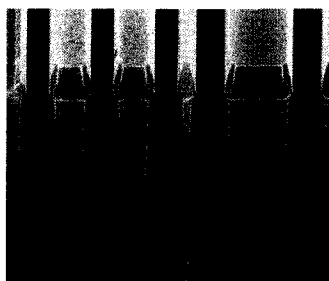


MEGAPOSIT SPR 220 SERIES PHOTORESIST

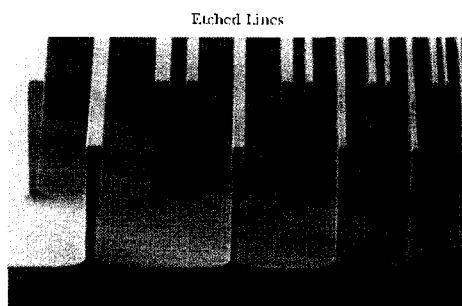
ETCH RESISTANCE

Figure 8 shows the etch performance of SPR220 with a Bosch Etch process (100:1 etch selectivity).

Figure 8. Etch Performance



Etched Lines (Bosch Process)
2.5 to 10 µm Features (up to 200 µm deep)



Etched Lines
5 to 20 µm Features (up to 100 µm deep)

PHOTORESIST REMOVAL

SPR220 can be removed with MICROPOSIT REMOVER 1165. A two-bath process is recommended with each bath at a temperature of 80°C (176°F). The first bath removes the bulk of the photoresist and the second removes residual traces of photoresist. Please consult specific remover data sheets for additional process information.

HANDLING PRECAUTIONS

CAUTION! SPR220 is a combustible liquid containing ethyl lactate, anisole and n-amyl acetate. Handle with care. Ground and bond all containers when handling or transferring combustible materials. Contact with eyes, skin and mucous membranes can cause irritation. In case of eye or skin contact, flush affected areas with plenty of water for at least 15 minutes. If irritation persists, contact your physician immediately. Avoid breathing vapors or mists. Use with adequate ventilation. It is highly recommended that during handling chemical goggles, chemical gloves and protective clothing be worn.

Please consult the Material Safety Data Sheet prior to use.

WASTE TREATMENT

SPR220 contains ethyl lactate, anisole and n-amyl acetate and may be included with other wastes containing similar organic solvents to be discarded for destruction or reclaim in accordance with local, state, and federal regulations.

It is your responsibility to ensure the disposal of SPR220 and residues therefrom is made in compliance with all applicable environmental regulation.

STORAGE

Recommended storage for SPR220 is in an upright position in a dry area at 40–60°F (4–15°F). Keep away from oxidizers, acids, and bases. Keep container sealed when not in use.

MEGAPOSIT, MF, MICROPOSIT, SPR, Rohm and Haas, and Rohm and Haas Electronic Materials are trademarks of Rohm and Haas Company, Philadelphia, PA, USA, or its affiliates.

UNITED STATES	JAPAN	ASIA	EUROPE
Marlborough, MA	Tokyo	Hong Kong	Paris, France
Tel: 800.832.6200	Tel: +81.3.5213.2910	Tel: +852.2680.6888	Tel: +33.1.40.02.51.00
Fax: 508.485.9113	Fax: +81.3.5213.2911	Fax: +852.2680.6333	Fax: +33.1.40.02.51.07

For Industrial Use Only. This information is based on our experience and is, to the best of our knowledge, true and accurate. However, since conditions for use and handling of products are beyond our control, we make no guarantee or warranty, expressed or implied, regarding the information, the use, handling, storage or possession of the products, or the applications of any process described herein or the results sought to be obtained. Nothing herein shall be construed as a recommendation to use any product in violation of any patent rights.

Annexe 6 : Paramètres utilisés pour l'application de la SPR 220

Tableau A6.1 Paramètres de la recette de photolithographie avec la SPR 220 7.0

Étape	Produit utilisé	Paramètres
Application de la résine	Megaposit™ SPR™ 220 7.0	À la pipette, suivi d'un repos de 30 min sous une coupole en verre à température ambiante
Étalement de la résine	Megaposit™ SPR™ 220 7.0	Étalée par tournette 30s à 3500 rpm
Recuit de la résine (softbake)		Rampe de 30°C à 115°C durant 30 min suivi d'un refroidissement sur la plaque (~1h)

Tableau A6.2 Paramètres de la recette de photolithographie avec la SPR 220 3.0

Étape	Produit utilisé	Paramètres
Étalement promoteur d'adhérence	HMDS	Étalé par tournette 40s à 4000 rpm
Étalement de la résine	Megaposit™ SPR™ 220 3.0	Étalée par tournette 40s à 1500 rpm
Recuit de la résine (softbake)		Rampe de 30°C à 115°C en 2 min puis 90 s à 115°C
Développement de la résine	Développeur MF 319	3 minutes par immersion

Annexe 7 : Paramètres optimisés de la gravure DRIE

Tableau A7.1 Paramètres optimisés de la gravure DRIE

Recette	Étape	Temps	Pression	Souree	Substrat	Flux
Initiale	gravure	7s	30 mT	1000 W	30 W	$\text{SF}_6 = 100 \text{ sccm}$ $\text{C}_4\text{F}_8 = 1 \text{ sccm}$ $\text{O}_2 = 0 \text{ sccm}$
	dépôt	4s	30 mT	1000 W	5 W	$\text{SF}_6 = 1 \text{ sccm}$ $\text{C}_4\text{F}_8 = 100 \text{ sccm}$ $\text{O}_2 = 0 \text{ sccm}$
Finale	gravure	5s	20 mT	450 W	10 W	$\text{SF}_6 = 50 \text{ sccm}$ $\text{C}_4\text{F}_8 = 1 \text{ sccm}$ $\text{O}_2 = 5 \text{ sccm}$
	dépôt	3s	20 mT	450 W	0 W	$\text{SF}_6 = 1 \text{ sccm}$ $\text{C}_4\text{F}_8 = 80 \text{ sccm}$ $\text{O}_2 = 0 \text{ sccm}$