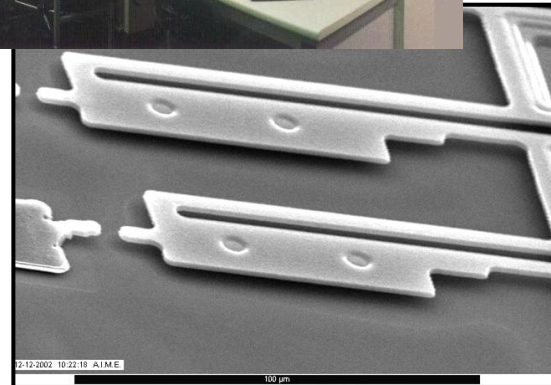
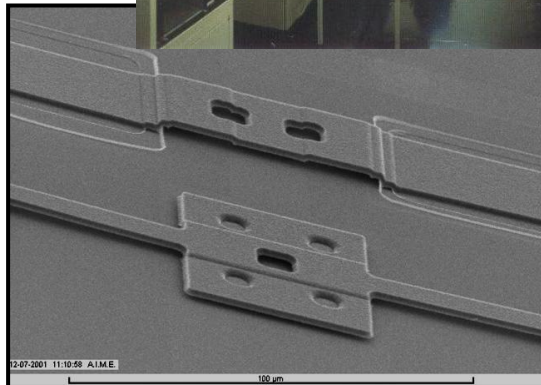
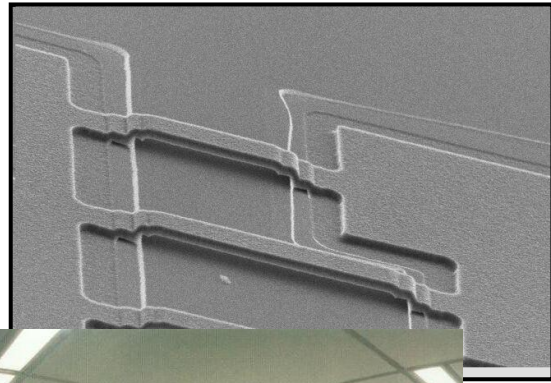
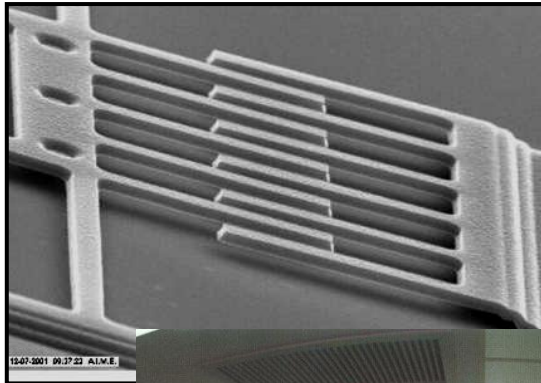


MEMS

(Micro-Electro-Mechanical Systems)



PLOS4

(Poly Libéré sur Oxyde Sacrificiel)

Process AIME - PLOS 4

Poly Libéré sur Oxyde Sacrificiel

1. INTRODUCTION

Ce process fait partie d'une famille dont l'objectif commun est la création de structures mobiles en polysilicium.

- PLOS-2 : 2 niveaux de masque : ANCRAGE, POLY
- PLOS-3 : 3 niveaux : DOPAGE, ANCRAGE, POLY
- PLOS-4 : 4 niveaux : DOPAGE, BOSSAGE, ANCRAGE, POLY

1.1 PLOS-2

Le masque ANCRAGE permet de créer des ouvertures dans l'oxyde sacrificiel, qui vont permettre d'ancrer sur le substrat les structures en polysilicium.

Ce process permet d'observer la libération des structures en poly et l'effet éventuel des contraintes.

Le test électrique des dispositifs n'est envisageable que pour les dispositifs à action latérale, thermiques ou électrostatiques.

Pour que ce test électrique soit possible, il faut un poly fortement dopé et un substrat très faiblement dopé de polarité opposée. (Poly N, substrat P)

1.2 PLOS-3

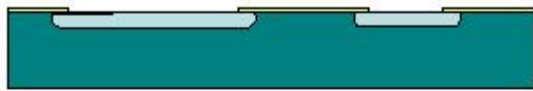
Par rapport au PLOS-2, la création préalable de régions dopées dans le substrat permet :

- isolation des ancrages par rapport au substrat par jonctions
- actions électrostatiques verticales
- détection électrique de contact entre poly mobile et substrat (micro-relais)
- création de reliefs sur la face inférieure des structures en poly, réduisant le risque de collage.

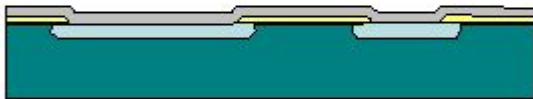
Pour bénéficier du dernier point, il faut masquer le dopage par oxyde plutôt que par résine. D'autre part le masquage par oxyde permet d'avoir des repères d'alignement pour les niveaux suivants.

Avec un substrat P on pourra utiliser indifféremment les dopage Phosphore au four POCl₃ ou Arsenic à l'implanteur.

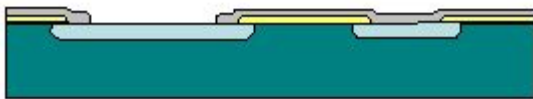
PROCESS PLOS 3



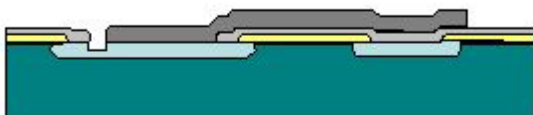
Ouverture diffusion et dopage N



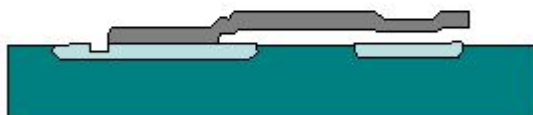
Dépôt oxyde



Ouverture ancrages

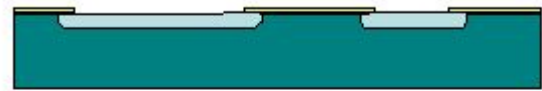


Dépôt poly-silicium et gravure

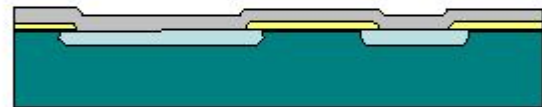


Libération par attaque oxyde

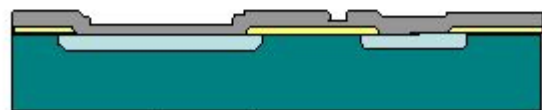
PROCESS PLOS 4



Ouverture diffusion et dopage N



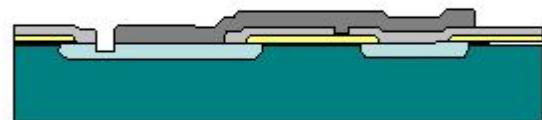
Dépôt oxyde



Gravure bossages



Ouverture ancrages



Dépôt poly-silicium et gravure



Libération par attaque oxyde

1.3 PLOS-4

Pour réduire le risque de collage des structure mobiles, on crée des petites régions en relief ou bossages sur la face inférieure de ces structures.

Pour cela on effectue une gravure partielle de l'oxyde sacrificiel.

Le masque des bossages comprend également des ouvertures à l'endroit des ancrages, ce qui réduit l'épaisseur à graver lors de l'ouverture des ancrages, donc la hauteur des marches à franchir par le polysilicium.

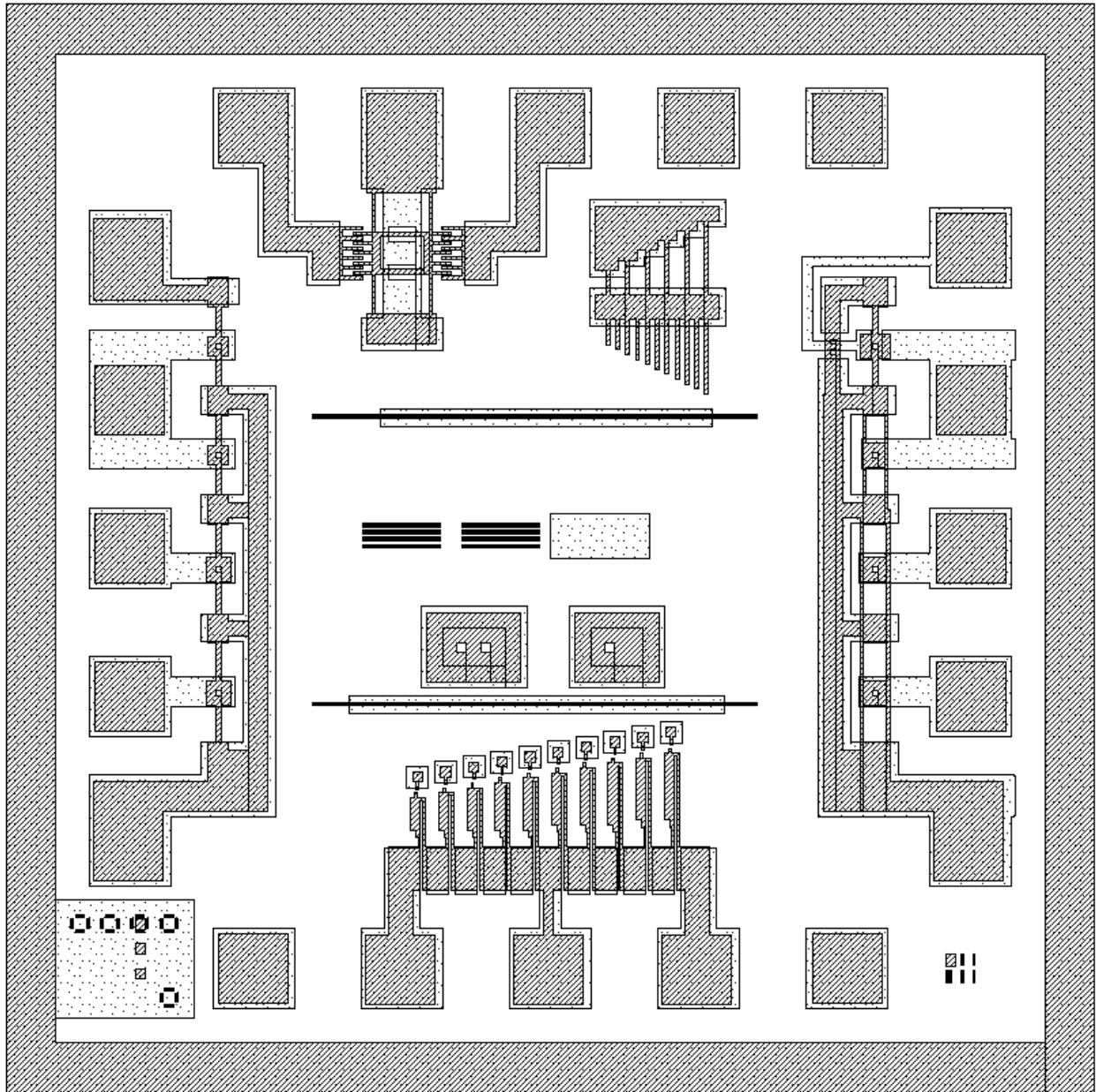
2. RÉSUMÉ DE LA SÉQUENCES D'OPÉRATIONS DE PLOS 4

PLOS-4

opération	paramètres
substrat	P
oxydation de masquage	ox. humide, env. 400 nm
photogravure 1	masque DIFF
gravure oxyde de masquage	buffer HF, env 6 mn
dopage N	four POCl ₃ ou implanteur
dépôt oxyde	LPCVD ou sputtering, 2 microns
photogravure 2	masque BOSS
attaque oxyde	buffer HF, fraction de l'épaisseur
photogravure 3	masque ANCR
attaque oxyde	buffer HF, jusqu'au substrat
dépôt polysilicium	LPCVD, 2 microns, non dopé
recuit polysilicium + dopage	four POCl ₃ , env. 2h, max 1100 degrés
photogravure 4	masque POLY
gravure poly	Gravure plasma (GIR)
libération	HF 25 %, env 30 mn
rinçage - séchage	eau DI puis ethanol, séchage sous vide

3. LE JEU DE MASQUES PLOS4

Ce jeu de masques contient 256 répétitions d'une puce de 2mm de coté.

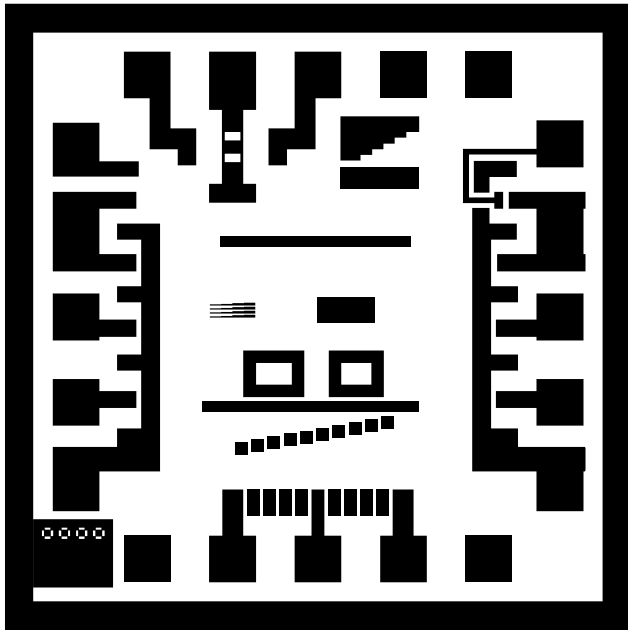


Sur la figure ci-dessus représentant une puce sont visibles seulement les niveaux Dopage (niveau 1) et Poly (niveau 4).

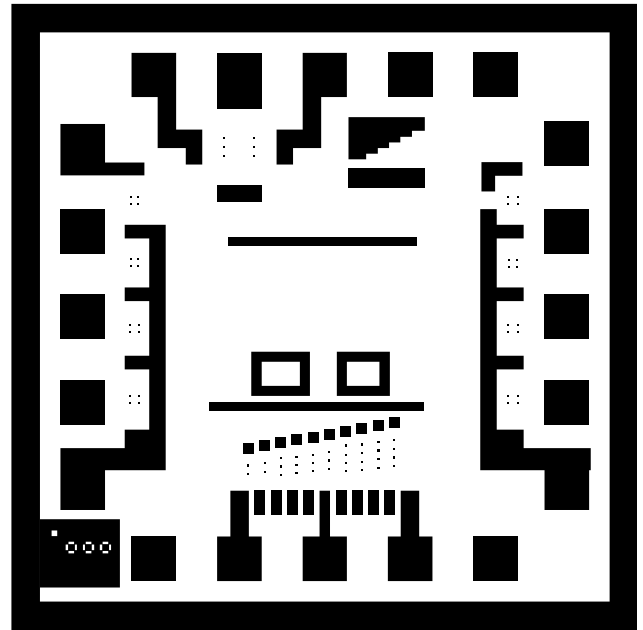
Sur la page suivante on voit les 4 niveaux séparément.

Ils présentent une certaine ressemblance, car chaque ouverture d'ancrage est englobée dans une ouverture de bossage elle même contenue dans une ouverture de dopage avec à chaque fois une certaine marge.

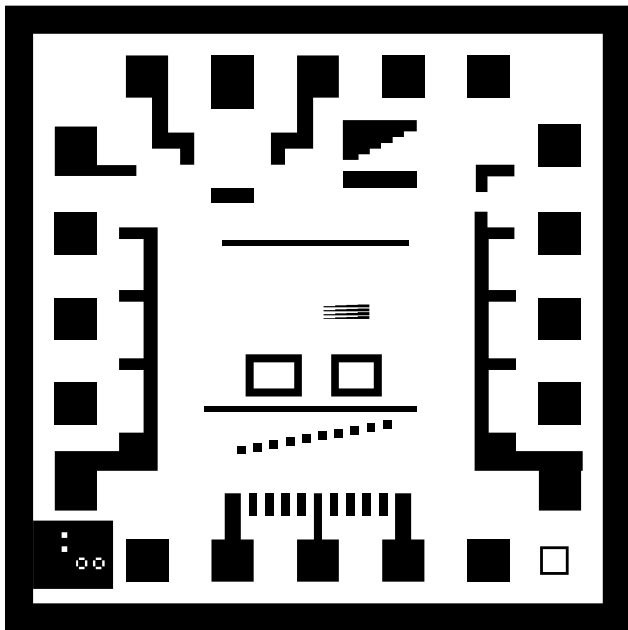
L'objectif de cette superposition d'ouvertures est d'éviter de percer en une fois toute l'épaisseur de l'oxyde sacrificiel : d'une part on évite une gravure profonde qui engendrerait des effets latéraux (inhérents à la gravure humide), d'autre part on remplace une marche d'oxyde élevée par 3 marches moins haute, ce qui diminue le risque de discontinuité de la couche de polysilicium au franchissement de ces marches.



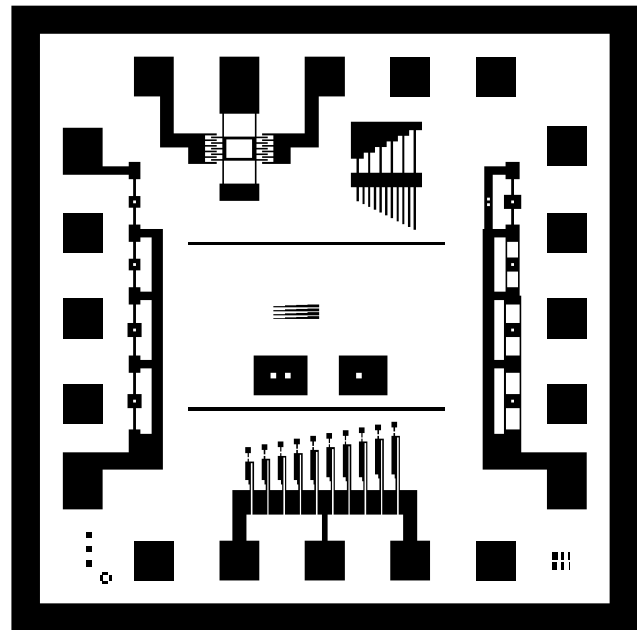
NIV. 1 : DOPAGE



NIV. 2 : BOSSAGE



NIV. 3 : ANCRAGE

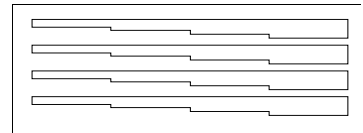


NIV. 4 : POLY

Le niveau bossage présente en plus de très petits trous qui vont engendrer les bossages proprement dits (ils ne sont pas nécessairement visibles à cette échelle).

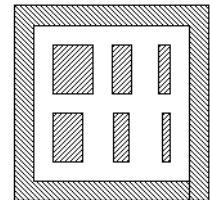
3.1 Motifs de test de résolution

Sur chaque niveau, le motif de test contient des bandes de 4 largeurs :
4 microns, 6 microns, 8 microns, 10 microns
Les espacements entre les bandes prennent les 4 mêmes valeurs.



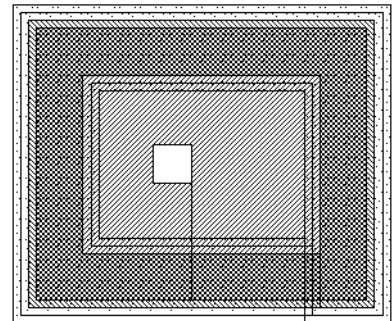
3.2 Motifs de test de libération

Ces rectangles de polysilicium n'ayant pas d'ancrage sont supposés disparaître lors de l'attaque de libération. Le plus grand a une largeur de 20 microns. Ils sont destinés à l'observation avant le séchage final, pour vérifier que l'attaque de l'oxyde sacrificiel a été suffisante.



3.3 Membranes percées

Ces membranes de polysilicium sont entièrement ancrées à la périphérie, et présentent un petit trou pour la pénétration de la solution d'attaque de l'oxyde. Elles permettent d'observer par transparence du poly la présence d'éventuels résidus d'oxyde.



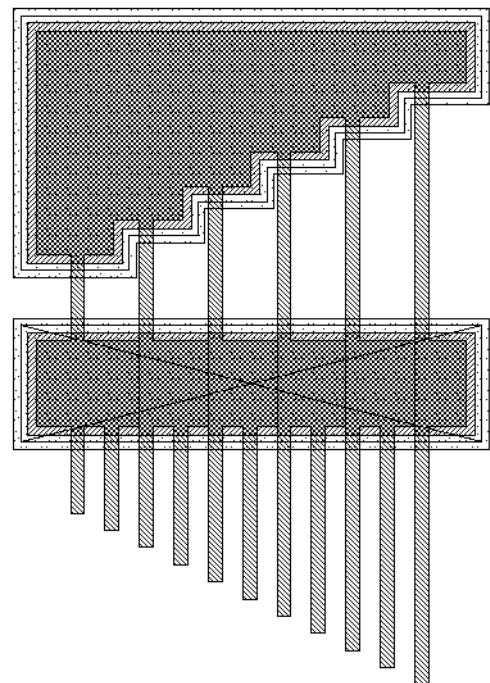
3.4 Poutres et ponts simples

Ces poutres et ponts de longueurs variées servent à évaluer la qualité du process, au niveau contraintes et libération.

Le cintrage éventuel des ponts indique une contrainte de compression du poly par rapport au substrat, celui des poutres une contrainte dans l'épaisseur du poly.

La largeur uniforme est de 8 microns, y compris au franchissement des marches d'oxyde. Les longueurs vont de 50 microns à 150 microns.

Ces éléments n'ont pas de bossages.



3.5 Dispositif à action électrostatique horizontale

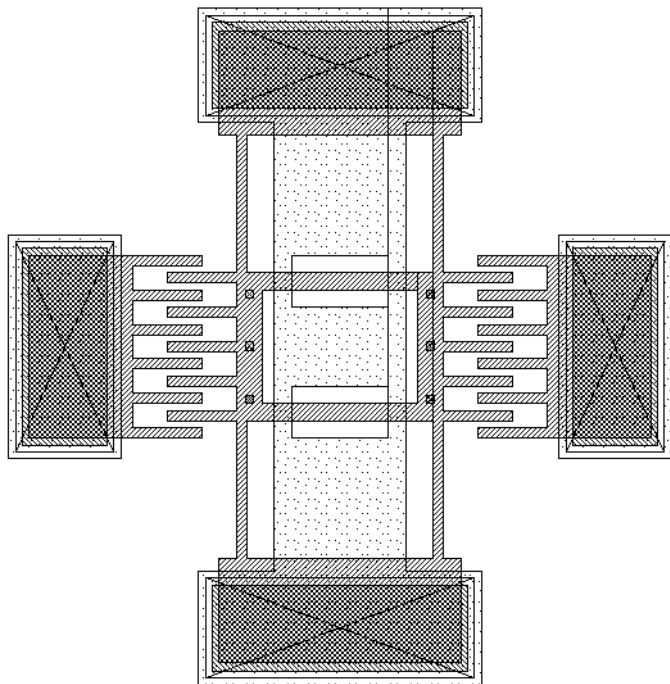
La capacité de deux peignes imbriqués varie lorsqu'on en déplace un dans la direction parallèle aux dents.

On peut donc utiliser ce dispositif comme capteur capacitif de déplacement parallèle au substrat ou comme actionneur linéaire.

La partie centrale mobile est liée aux ancrages par 4 poutres élastiques, et porte 6 bossages.

La largeur des poutres et des dents de peigne est de 6 microns, l'intervalle entre les dents est de 4 microns.

L'isolation par jonction des ancrages permet l'application d'une différence de potentiel entre les peignes.



Des dispositifs similaires sont utilisés comme résonateurs, comme accéléromètres et comme micro-actionneurs.

3.6 Dispositif à action électrostatique verticale

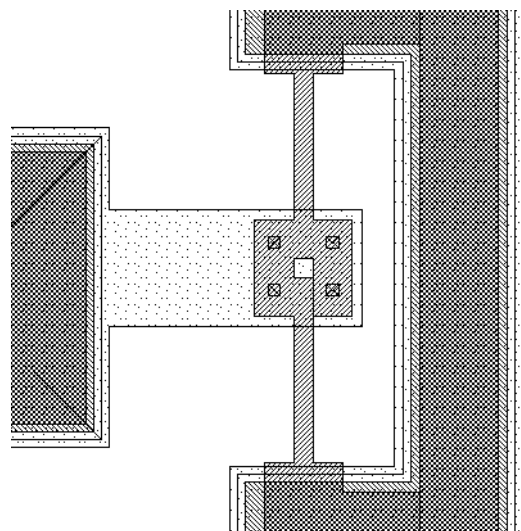
Ce dispositif comporte un pont dont la partie centrale élargie (palette) forme un condensateur avec une région dopée du substrat.

On peut donc utiliser ce dispositif comme capteur capacitif de déplacement perpendiculaire au substrat ou comme actionneur linéaire.

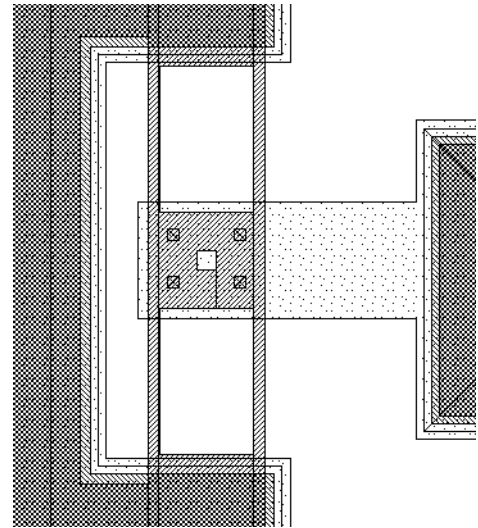
La palette est percée d'un trou pour faciliter l'attaque de l'oxyde sacrificiel, et porte 4 bossages.

La largeur des poutres est 10 microns.

Des dispositifs similaires sont utilisés comme accéléromètres et comme micro-relais.



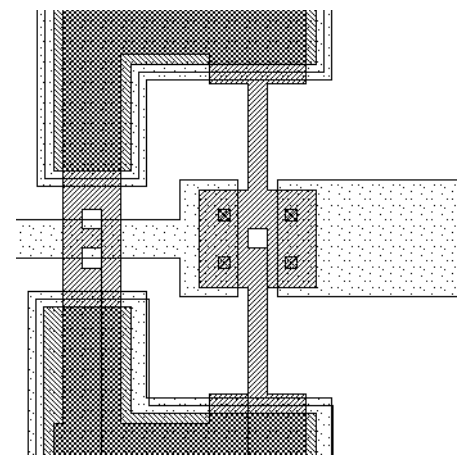
Similaire au précédent, ce dispositif a une palette portée par 4 poutres, de largeur 6 microns.



Toujours à action électrostatique verticale, cet autre dispositif possède deux électrodes diffusées sous la palette.

Ceci permet de contrôler éventuellement un mouvement de torsion du pont.

C'est par un principe similaire que fonctionnent les micro-miroirs des imageurs vidéo DLP (Texas Instruments).



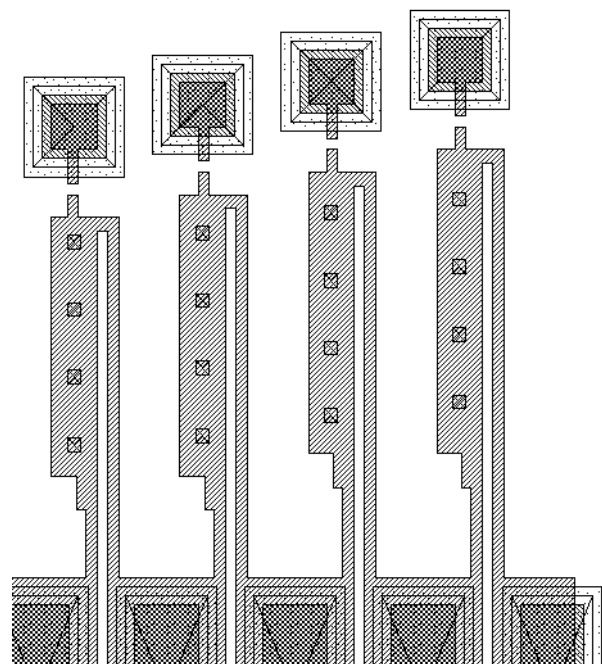
3.7 Actionneurs thermiques

Chacun de ces dispositifs est un conducteur en forme de U, dont une branche est beaucoup plus large que l'autre.

En faisant passer un courant dans ce conducteur, on obtient un échauffement rapide car il n'est pas refroidi par conduction avec le substrat.

La branche mince du U atteint une température plus élevée que l'autre, il en résulte une différence de dilatation qui provoque une flexion latérale de l'ensemble.

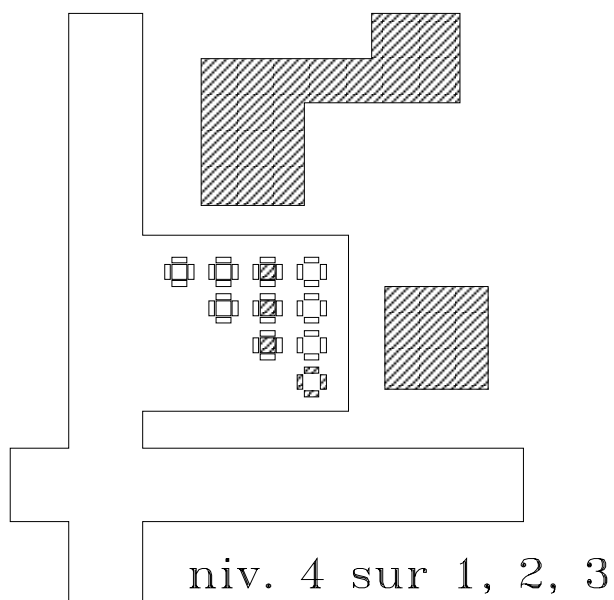
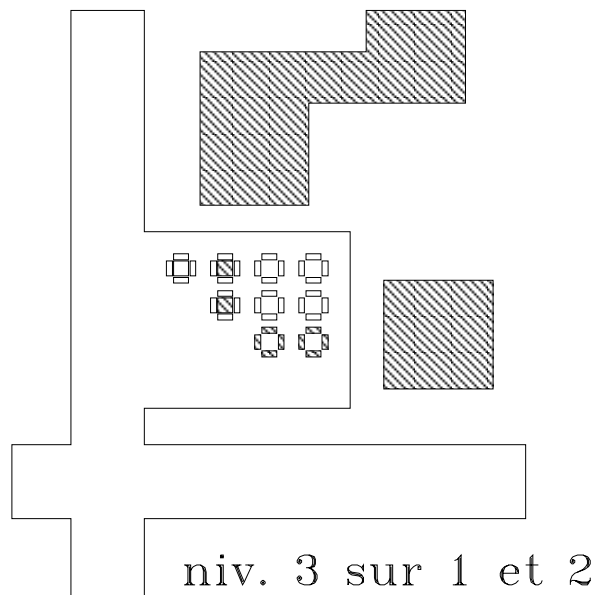
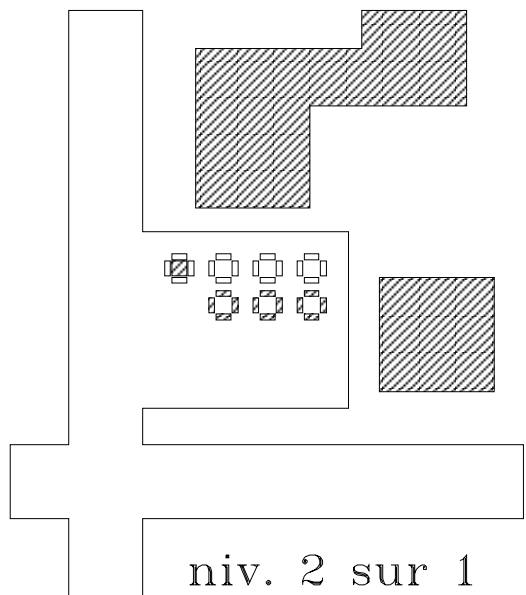
Les actionneurs thermiques sont plus lents que les actionneurs électrostatiques, mais capables d'efforts très supérieurs.



Chaque élément porte 4 bossages. La largeur de la branche mince est de 5 microns.

3.8 Motifs d'alignement

Le triangle de motif d'alignement permet d'aligner le niveau N avec les N-1 niveaux antérieurs. Le triangle utilisé ici est prévu pour une extension du process à 5 niveaux.



PLOS4

Alignements

4. SÉQUENCE DÉTAILLÉE DES OPÉRATIONS

4.1 Oxydation de masquage

- Dégraisser les plaquettes (trichloréthylène puis acétone puis eau)
- Nettoyage $H_2O_2 + H_2SO_4$ (1/1) (2mn)
- Traiter les plaquettes composants et le témoin numéro 1 dans le four d'oxydation humide.

parametres

Température	Temps	Débits
800 à 1100 degrés C	25 mn	N2 = 1 l/mn
1100 degrés C	40 mn	H2 = 2.7 l/mn, O2 = 1.5 l/mn
1100 degrés C	30 mn	O2 = 2.2 l/mn
1100 degrés C	10 mn	Ar = 1.5 l/mn
1100 à 800 degrés C	60 mn	N2 = 1 l/mn

- Mesurer l'épaisseur d'oxyde à l'ellipsomètre

4.2 Photogravure 1 "ouverture dopage"

- Si nécessaire, séchage de la plaquette (étuve 120 degrés C pendant 5 mn)
- Dépôt de promoteur d'adhérence HMDS (tournette 4000 t/mn)
- Dépôt de résine "Shipley 1813" (tournette 4000 t/mn)
- Première cuisson (plaque chauffante 100 degrés C, 60 secondes)
- Insolation (4 s)
- Développement (20 degrés C, 30s)
- Observation au microscope optique
- Seconde cuisson (plaque chauffante 120 degrés C, 45 secondes)
- Attaque au buffer HF (durée calculée d'après l'épaisseur + 30s)
- Observation au microscope optique

- Enlèvement résine (acétone puis eau)
- Nettoyage chimique plaquette et témoin 1, H₂O₂ + H₂SO₄ (1/1) (2mn)
N.B. utiliser un témoin 1 non oxydé.

4.3 Dopage

- Traiter les plaquettes composants et le témoin numéro 1 dans le four de prédepôt de phosphore préalablement stabilisé à 1050 degrés C.

parametres

Température	Temps	Débits
1050 degrés C	5 mn	N ₂ = 2 l/mn, O ₂ = 0.1 l/mn
1050 degrés C	5 mn	N ₂ = 2 l/mn, O ₂ = 0.1 l/mn, POCl ₃ = 5 mg/min
1050 degrés C	5 mn	N ₂ = 2 l/mn, O ₂ = 0.1 l/mn

- Programmer le four pour une descente à 500 degrés si s'il n'y a pas d'autre dopage prévu
- (optionnel) enfourner le témoin dans ce four et lui appliquer un recuit identique à celui du 4.9, sans POCl₃
- (différé) effectuer la mesure de résistance par carré (4 pointes) et la mesure de profondeur de jonction "Xj" sur ce témoin après l'avoir desoxydé au buffer HF, noter les résultats dans le tableau de caractérisation

4.4 Depôt d'oxyde LPCVD dit "LTO"

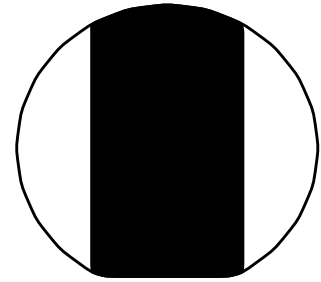
- Traiter les plaquettes et le témoin numéro 2 (oxydé) dans le four de dépôt LPCVD de SiO₂

parametres

Température	Temps	Débits	Pression
420 degrés C	env. 30 mn	cycles de pompages et purges N ₂	
420 degrés C	45 mn	SiH ₄ = 60cc/min, O ₂ = 120cc/min	400 mTorr
420 degrés C	env. 20 mn	cycles de purges N ₂ et pompages	

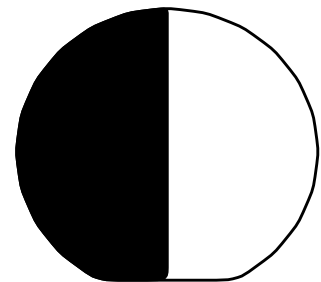
4.5 Traitement témoin avant Photogravure 2 “ouverture bossages”

- Masquer la région centrale du témoin 2 avec la cire apiézon (voir figure)



- Attaquer le témoin au buffer HF jusqu'à atteindre le substrat (réaction hydrophobe), noter la durée dans le tableau de caractérisation
N.B. cette durée correspond à l'attaque du total oxyde de masquage + oxyde "LTO".

- Nettoyer le témoin (trichloréthylène, acétone, eau), mesurer la marche au profilometre, noter sa hauteur dans le tableau de caractérisation
- Masquer la moitié gauche du témoin 2 avec la cire apiézon



- On se donne pour but de consacrer aux bossages une fraction de la hauteur totale d'oxyde sacrificiel (par exemple 40%).

Compte tenu des durées d'attaque des oxydes de masquage et "LTO" et de leurs épaisseurs, calculer la durée d'attaque pour les bossages permettant d'atteindre cet objectif.

Attaquer le témoin pendant cette durée et la noter dans le tableau de caractérisation

- Nettoyer le témoin (trichloréthylène, acétone, eau), mesurer la marche centrale et celle de droite au profilometre, vérifier que l'objectif est atteint, noter les valeurs dans le tableau de caractérisation.

4.6 Photogravure 2 “ouverture bossages”

- Si nécessaire, séchage de la plaquette (étuve 120 degrés C pendant 5 mn)
- Dépôt de promoteur d'adhérence HMDS (tournette 4000 t/mn)
- Dépôt de résine "Shipley 1813" (tournette 4000 t/mn)
- Première cuisson (plaque chauffante 100 degrés C, 60 secondes)
- Alignement, insolation (5 s)
- Développement (20 degrés C, 30s)

- Observation au microscope optique
- Seconde cuisson (plaque chauffante 120 degrés C, 45 secondes)
- Attaque au buffer HF (durée testée à l'aide du témoin, éventuellement corrigée)
- Observation au microscope optique
- Enlèvement résine (acétone puis eau)

4.7 Photogravure 3 “ouverture ancrages”

- Séchage de la plaquette (étuve 120 degrés C pendant 5 mn)
- Dépôt de promoteur d'adhérence HMDS (tournette 4000 t/mn)
- Dépôt de résine “Shiple 1813” (tournette 4000 t/mn)
- Première cuisson (plaque chauffante 100 degrés C, 60 secondes)
- Alignement, insolation (4 s)
- Développement (20 degrés C, 30s)
- Observation au microscope optique
- Seconde cuisson (plaque chauffante 120 degrés C, 45 secondes)
- Attaque au buffer HF (durée calculée d'après le témoin, majorée de 30 s.)
N.B. l'objectif est de traverser seulement l'épaisseur d'oxyde subsistant sous les ouvertures de dopage et de bossage.
- Observation au microscope optique
- Enlèvement résine (acétone puis eau)
- Opération optionnelle : attaque au buffer HF pour arrondir les arêtes des bords des ouvertures (durée maxi 30 s.)
- Nettoyage chimique, plaquettes composants + témoin 2 ($H_2O_2 + H_2SO_4$, 2mn)

4.8 Dépôt de polysilicium LPCVD non dopé

Traiter les plaquettes et le témoin numéro 2 dans le four de dépôt LPCVD de SiO₂

parametres

Température	Temps	Débits	Pression
400 à 605 degrés C	env. 30 mn	N ₂ = 1 l/mn	1 Torr
605 degrés C	120 mn	SiH ₄ = 50 cc/min	250 mTorr
605 à 400 degrés C	env. 45 mn	cycles de purges N ₂ et pompages	1 Torr

4.9 Recuit + dopage du polysilicium

Traiter les plaquettes composants et une moitié du témoin 2 (coupé parallèlement au méplat) dans le four de pré-dépôt de phosphore préalablement stabilisé à 500 degrés C.

parametres

Température	Temps	Débits
22 à 500 degrés C	min 5 mn	chargement manuel
500 a 1100 degrés C	60 mn	N ₂ = 1 l/mn
1100 degrés C	5 mn	N ₂ = 2 l/mn, O ₂ = 0.1 l/mn
1100 degrés C	5 mn	N ₂ = 2 l/mn, O ₂ = 0.1 l/mn, POCl ₃ = 5 mg/min
1100 degrés C	5 mn	N ₂ = 2 l/mn, O ₂ = 0.1 l/mn
1100 à 500 degrés C	80 mn	N ₂ = 1 l/mn
500 à 22 degrés C	min. 5 mn	déchargement manuel

En parallèle, effectuer sur la moitié de témoin 2 disponible un masquage à la cire apiezon (parallèlement au méplat) et une attaque (bain attaque poly) pour mesurer l'épaisseur de polysilicium déposé (N.B. la mesure doit être effectuée dans la région où le polysilicium est déposé sur de l'oxyde, car le bain d'attaque poly attaque aussi le substrat).

Après le recuit, effectuer sur la moitié recuite de témoin 2 la mesure de résistance par carré (4 pointes après désoxydation au buffer HF) du polysilicium.

4.10 Photogravure 4 “polysilicium”

- Attaque de la couche d’oxyde formée lors du dopage (HF 10% ou buffer HF)
- Séchage de la plaquette (plaque 120 degrés C pendant 3 mn)
- Dépôt de résine “Shipley 1813” (tournette 4000 t/mn)
- Première cuisson (plaque chauffante 100 degrés C, 60 secondes)
- Alignement, insolation (4 s)
- Développement (20 degrés C, 30s)
- Observation au microscope optique
- Seconde cuisson (plaque chauffante 120 degrés C, 45 secondes)
- Gravure du polysilicium par gravure ionique réactive (plasma)

parametres

Puissance RF	Temps	Débits	Pression
50 W	selon épaisseur	SF6 = 30 cc/mn (afficher 60)	0.02 mbar

L’interféromètre permet de détecter la fin de l’attaque. Ajouter 30 secondes pour absorber les éventuelles variations d’épaisseur.

En cas de non-réponse de l’interféromètre, appliquer une durée calculée selon l’épaisseur, plus 30 s. (Vitesse nominale : 400 nm/mn. N.B. Vitesse d’attaque de la résine : env. 100 nm/mn)

- Observation au microscope optique
- Enlèvement résine (acétone puis eau)

4.11 Attaque de libération

- Attaquer la plaquette dans une solution de HF à 49% (concentration maxi) pendant 30 minutes
- Rincer à l’eau (min 15 minutes) avec précautions, porter la plaque immergée dans 2 à 3 mm d’eau sous le microscope optique pour vérifier la disparition des éléments non ancrés.

N.B. Après l’attaque de libération, il est indispensable de maintenir la plaquette **mouillée**, et d’éviter tout séchage prématuré par évaporation.

Pour transporter la plaquette d’un bain à un autre, on s’abstiendra de l’égoutter et on la maintiendra horizontale pour garder un ménisque de liquide sur sa face supérieure.

4.12 Séchage final ou revêtement anti adhésion “SAM”

Deux procédés sont possibles, le séchage simple sous vide, ou le séchage après application d'un revêtement anti adhésion, plus coûteux et complexe mais susceptible de donner un meilleur rendement.

- **Option “séchage sous vide“ :**

- Rincer à l'éthanol tiède
- Sècher sous vide primaire

- **Option “SAM”**

“SAM” pour “Self-Assembled Monolayer”, ou couche mono-moléculaire auto-assemblée.

Le principe est de revêtir le silicium d'une couche de molécules présentant vers l'extérieur une extrémité fortement hydrophobe, ce qui réduira le risque de stiction au séchage final.

Le procédé consiste en une séquence de traitements liquides qui doivent être enchaînés sans séchage intermédiaire.

L'oxydation préliminaire va créer une couche de SiO₂ (hydrophile) qui va faciliter la création de la couche SAM.

- Oxydation préliminaire (H₂O₂ concentration maxi, 15 mn), rinçage à l'eau D.I.

Les étapes suivantes vont transférer la plaquette de l'eau à l'iso-octane en passant par l'alcool isopropylique

- Remplacer graduellement l'eau du bain par de l'alcool isopropylique (IPA)
- Transférer la plaquette dans de l'IPA pur.
- Transférer la plaquette dans un bain neuf d'IPA pur.
- Remplacer graduellement l'IPA du bain par de l'iso-octane
- Transférer la plaquette dans de l'iso-octane pur.
- Transférer la plaquette dans un bain neuf d'iso-octane pur.

Préparation de la solution SAM (cette solution ne se conserve pas longtemps)

- Mélanger 20ml d'hexadecane et 5ml de chloroforme
- Ajouter 4 gouttes d'octadecyltrichlorosilane (OTS), agiter doucement
Attention : produit **dangereux**, les stagiaires ne doivent pas le manipuler pur.

Si la solution devient franchement visqueuse, c'est qu'on a trop mis d'OTS. Il faut la jeter et recommencer avec une dose plus faible.

Revêtement SAM

- Transférer la plaquette dans la solution SAM pour 15 minutes

Les étapes suivantes vont transférer la plaquette de la solution SAM à l'eau DI en passant par l'iso-octane et l'alcool isopropylique

- Remplacer graduellement la solution SAM par de l'iso-octane
- Transférer la plaquette dans de l'iso-octane pur.
- Remplacer graduellement l'iso-octane par de l'IPA
- Transférer la plaquette dans de l'IPA pur.
- Transférer la plaquette dans de l'eau DI.

Séchage final.

- Sortie la plaquette du bain, elle doit être sèche..

Résumé :

H₂O -> H₂O₂ -> H₂O -> IPA -> iso-octane -> SAM -> iso-octane -> IPA --> H₂O

Glossaire chimique

eau oxygénée	H ₂ O ₂
IPA = alcool iso-propylique = isopropanol	(CH ₃) ₂ CHOH
iso-octane = 2,2,4-trimethylpentane	(CH ₃) ₂ CHCH ₂ C(CH ₃) ₃
hexadecane	CH ₃ (CH ₂) ₁₄ CH ₃
chloroforme	CHCl ₃
octadecyltrichlorosilane	CH ₃ (CH ₂) ₁₇ SiCl ₃

4.13 Observation finale

- Observer au microscope optique puis au microscope électronique à balayage

5. TABLEAU DE PARAMÈTRES

stage	
groupe	
noms	

couche	durée d'attaque		épaisseur profilomètre		épaisseur ellipsomètre
	témoin	composants	témoin	composants	témoin
oxyde de masquage					
total des oxydes					
bossages					
oxyde sous bossages					
polysilicium					

	avant recuit	après recuit
résistance par carré dopage N		
profondeur de jonction Xj		

résistance par carré polysilicium	
durée attaque libération	