

50376
1991
102

67515

50376
1991
102

THESE de DOCTORAT

Présentée à
L'Université des Sciences et Techniques
de Lille Flandres-Artois

Spécialité

ELECTRONIQUE

Présentée par

SABINE HAZEBROUCK

Sujet de la thèse :



**PLANARISATION DE STRUCTURES MULTICOUCHES
EN TECHNOLOGIE BIPOLAIRE DE CIRCUITS INTEGRES
A HAUTE DENSITE D'INTEGRATION**

Soutenue le 27 Mars 1991, devant la commission d'examen :

Président : M. E. CONSTANT

Rapporteurs : M. A. FORTINI
M. L. RACZY

Examineurs : M. D. COLLARD
M. J. LEBAILLY

Cette thèse a été préparée
dans le cadre d'une convention CIFRE,
dans le centre industriel de microélectronique PHILIPS à Caen,
avec le soutien du Laboratoire d'études des surfaces et des interfaces,
Unité de Recherche 253 Associée au CNRS,
et faisant partie de l'Institut Supérieur d'Electronique du Nord.

J'exprime ma reconnaissance à Monsieur le Professeur E. CONSTANT qui a accepté la présidence de ce jury.

Je remercie sincèrement Messieurs A. FORTINI et L. RACZY qui m'ont fait l'honneur d'accepter la charge de rapporteur de thèse et de participer au jury.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur J. LEBAILLY pour m'avoir accueilli dans son service, permis de réaliser cette étude dans les meilleures conditions, et pour la disponibilité dont il a témoigné en prenant part au jury.

Je remercie le Laboratoire de l'Institut Supérieure d'électronique du Nord et plus particulièrement Monsieur D. COLLARD pour l'aide précieuse apportée dans la réalisation de simulations. Je lui suis également reconnaissant de m'avoir conseillé pour une partie de la rédaction et pour avoir accepté d'être membre du jury.

J'exprime ma profonde reconnaissance à Monsieur J.M. DECROUEN pour sa disponibilité et ses conseils compétents, et pour m'avoir continuellement encouragé au cours de cette étude.

Je tiens à témoigner mon amitié à Madame C. MARAND GOMBAR qui a permis mon intégration rapide au sein de l'équipe de photogravure et qui a contribué au bon déroulement de ce travail.

J'adresse mes remerciements à tout le personnel de la fabrication des Circuits Intégrés et plus particulièrement aux personnes des secteurs de photogravure, de dépôt et d'analyse de défauts pour leur entière collaboration.

Je remercie enfin les services de la Qualité et des Produits qui m'ont permis d'avoir rapidement des résultats de tests électriques.

Sommaire

Chapitre 1 Introduction

1.1 Evolution industrielle des technologies silicium	9
1.2 Les techniques de planarisation	12
1.3 Présentation des travaux	14

Chapitre 2 Le Fluage des polymères

2.1 Introduction	17
2.2 Hypothèse d'un fluage idéal	18
2.2.1 Définition des paramètres	18
2.2.2 Détermination des épaisseurs de polymère suivant la topologie	19
2.2.2.1 Cas d'un réseau de conducteurs	19
2.2.2.2 Autres motifs : plots, conducteurs isolés	20
2.2.3 Conséquence théorique d'un fluage idéal sur la couche de diélectrique	21
2.3 Le mécanisme de fluage	23
2.3.1 Introduction	23
2.3.2 Théorie du mécanisme de fluage	24
2.3.3 Simulations numériques	26
2.3.3.1 Présentation du simulateur IMPACT4	26
2.3.3.2 Illustration du fluage d'un polymère	27
2.3.3.3 Influence des largeurs entre conducteurs sur la qualité du fluage	28
2.3.3.4 Influence des largeurs des conducteurs sur la qualité du fluage .	28

2.4 Développement d'un procédé de fluage	31
2.4.1 Les procédés existants	31
2.4.2 Choix du polymère	32
2.4.3 Les moyens de développement	33
2.4.3.1 Présentation des équipements utilisés	33
2.4.3.2 Présentation des plaques	34
2.4.3.3 Les instruments de caractérisation	34
2.4.4 Présentation du procédé de base	36
2.4.5 Influence de l'exposition	36
2.4.6 Le traitement thermique	37
2.4.7 Définition des conditions de fluage	40
2.5 Caractérisation de la couche de résine	41
2.5.1 Influence des largeurs de bandes	41
2.5.2 Influence de la densité des réseaux : Plan d'expérience	43
2.5.3 Conclusion	46

Chapitre 3 Etape d'etch-back

3.1 Introduction	48
3.2 Présentation Générale de la gravure par plasma	49
3.2.1 Le plasma	49
3.2.1.1 Qu'est-ce qu'un plasma ?	49
3.2.1.2 Conditions nécessaires pour l'obtention d'une gravure sèche .	50
3.2.2 La gravure de l'oxyde	50
3.2.2.1 Présentation des réactions de gravure dans un plasma de CF ₄ ..	50
3.2.2.2 Détermination des principaux agents de gravure de l'oxyde ...	51
3.2.2.3 La polymérisation	52
3.2.3 La gravure de la résine	52
3.2.4 Conclusion	53

3.3	Détermination du procédé de gravure	54
3.3.1	Présentation du réacteur	54
3.3.2	Préparation des essais	55
3.3.2.1	Préparation des échantillons	55
3.3.2.2	Définitions des mesures	56
3.3.3	Détermination d'un point de fonctionnement	57
3.3.3.1	Description des essais	57
3.3.3.2	Résultats des essais	57
3.3.4	Réalisation d'un plan d'expérience	62
3.3.4.1	Description des expériences	62
3.3.4.2	Résultats du plan d'expérience	63
3.4	Réalisation de l'etch-back	67
3.4.1	Choix du procédé d'etch-back	67
3.4.2	Etude de l'effet de charge	68
3.4.2.1	Caractérisation de l'effet de charge	68
3.4.2.2	Conséquences de l'effet de charge	69
3.4.2.3	Amélioration du procédé	70
3.4.3	Détermination des paramètres de contrôle	71
3.4.3.1	La marche finale	71
3.4.3.2	L'épaisseur de diélectrique après etch-back	73
3.4.3.3	La variation d'épaisseurs de diélectrique	74
3.4.4	Détermination de la qualité de la planarisation après etch-back	75
3.4.4.1	La marche finale.....	75
3.4.4.2	L'épaisseur de diélectrique gravé	76
3.4.4.3	La variation d'épaisseur de diélectrique	78
3.5	Conclusion	79

Chapitre 4 Le procédé Subilo

4.1 Introduction	81
4.2 Présentation du procédé Subilo	82
4.2.1 Description générale	82
4.2.2 Etude de la topographie	83
4.2.2.1 Description de la topographie après certaines étapes	83
4.2.2.2 Les modifications possibles du procédé	86
4.3 Planarisation du diélectrique par REB : Résultats topologiques	88
4.3.1 Description des opérations	88
4.3.2 Contrôle de la qualité de la planarisation au MEB	91
4.3.3 La reproductibilité de la planarisation	94
4.3.3.1 Mise au point de la détection de fin d'attaque	94
4.3.3.2 Résultats de reproductibilité	97
4.3.4 Compatibilité avec la réalisation des vias	99
4.3.4.1 La détection de fin d'attaque	99
4.3.4.2 La sous-gravure des vias	99
4.3.4.3 La profondeur des vias	100
4.3.5 Conclusion	101
4.4 Planarisation du diélectrique par REB : Résultats électriques	102
4.4.1 Les caractéristiques du multicouche	102
4.4.1.1 Présentation du PCM (Process Module Controle)	102
4.4.1.2 Comparaison des résultats PCM	103
4.4.1.3 Mesures de Capacités	104
4.4.2 Tests d'électromigration	106
4.4.2.1 Description de l'électromigration	106
4.4.2.2 Résultats	107

4.4.3 Les rendements et la fiabilité	108
4.4.3.1 Présentation des tests de fiabilité	108
4.4.3.2 Résultats de rendements et de tests de fiabilité	109
4.4.4 Conclusion	110
Conclusion	111

Annexes

Annexe 2-1 : Description du Masque "PLANAR"	117
Annexe 2-2 : Planarisation de bandes isolées par la résine HPR204	118
Annexe 2-3 : Planarisation de réseaux par la résine HPR204	119
Annexe 3-1 : Présentation de l'équipement de gravure	120
Annexe 3-2 (1ère Partie) : Graphes d'isovaleurs - Vres -	121
Annexe 3-2 (2ème Partie) : Graphes d'isovaleurs - Vox et R -	122
Annexe 4-1 : Résultats du procédé de fluage sur des circuits réels	123
Annexe 4-2 : Résultats du procédé d'etch-back sur des circuits réels	125
Annexe 4-3 : Présentation du PCM	126
Annexe 4-4 : Circuit de test d'électromigration	127
Annexe 4-5 : Résultats de fiabilité des circuits planarisés	128

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1-1 Evolution industrielle des technologies silicium

Depuis l'invention du circuit intégré par J.S. Kilby en 1959 {1}, l'apparition des technologies SSI (Small-Scale-Integration) jusqu'aux technologies actuelles les plus performantes dénommées ULSI (Ultra Large Scale Integration), le nombre de composants par mm^2 ne cesse de croître pour atteindre le million de transistors par circuit.

Dans le milieu industriel, en utilisant les technologies VLSI (Very Large Scale Integration - dimension de l'ordre du micron), la fabrication des circuits intégrés bipolaires reposait jusqu'aux années 70 uniquement sur des procédés à jonction. Dans ce type de procédé, l'isolation des transistors est réalisée par des jonctions P-N, et occupe une place considérable. Vers les années 80, l'utilisation d'une isolation par oxyde enterré, appelé Buried LOCOS (LOCAL Oxydation of Silicon), augmente de façon remarquable l'intégration des composants. La densité passe alors de 120composants/ mm^2 à 500composants/ mm^2 , améliorant la rapidité des circuits. L'évolution des surfaces moyennes des circuits intégrés est illustrée à la figure 1-1.

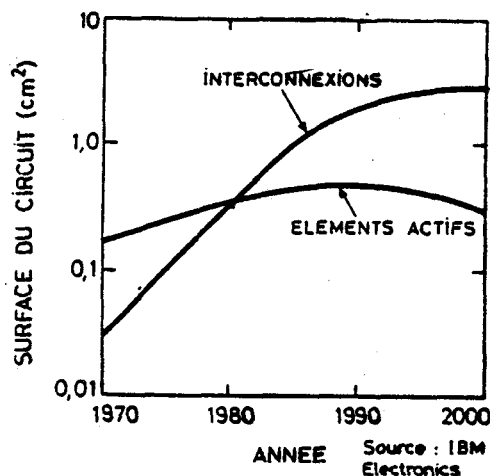


Figure 1-1 : Evolution de la surface moyenne des circuits intégrés comportant un seul niveau de métallisation en fonction des années

Face à une intégration de fonctions électriques de plus en plus complexes, la surface des circuits a relativement peu augmentée. La surface occupée par les éléments actifs a diminuée contrairement à la surface occupée par les interconnexions qui est devenu prépondérante. Les interconnexions limitent donc actuellement l'intégration des circuits intégrés.

Leur réalisation consiste en une succession d'étapes de dépôt, de photolithographie et de gravure. L'empilement successif de matériaux ainsi traités, crée une surface très perturbée que les couches diélectriques ou métalliques finissent par recouvrir difficilement. Des amincissements apparaissent aux passages de marches pouvant aller jusqu'à la rupture de la couche. Des règles de dessin sont alors imposées pour interdire la formation d'une topographie trop abrupte et pour assurer la qualité des produits. Cependant ces règles vont dans le sens contraire d'une densification. Pour augmenter la densification, deux solutions peuvent être proposées :

- 1) Utiliser une nouvelle technique, telle que la gravure par plasma, qui permettrait de diminuer l'espace séparant les bandes d'interconnexions. Mais, ce type de gravure crée des pentes abruptes (80° - 90°) qui sont difficiles à recouvrir par un autre matériau.
- 2) Augmenter le nombre de niveaux de métallisation.
Mais la surface engendrée serait encore plus perturbée, amplifiant ainsi les problèmes de couverture par les matériaux suivants.

Ainsi, pour résoudre tous ces problèmes de topographie et permettre une densification des niveaux de métallisation, il faut introduire des étapes de planarisation dans les procédés existants. La planarisation transforme les surfaces perturbées par des surfaces planes améliorant la qualité des dépôts diélectriques et surtout métalliques.

Chez Philips Composants à Caen, un procédé Subilo (SUBnanoseconde Isolation par Oxyde Localisé) a été développé ces dernières années. L'isolation des transistors est réalisée par le procédé Buried LOCOS. Une configuration typique de la structure d'un transistor NPN dans la technique Subilo est représentée en figure 1-2, laissant apparaître la forme d'oxyde d'isolation.

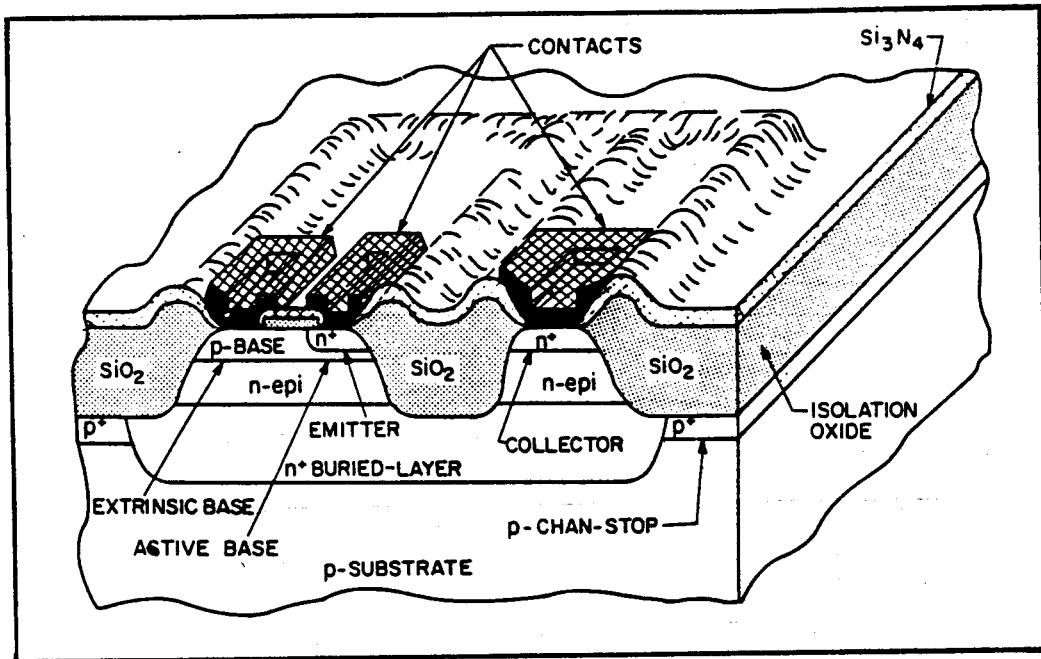


Figure 1-2 : Vue schématique d'un transistor bipolaire NPN isolé par la technique LOCOS

Sur la surface perturbée par la formation de "têtes d'oiseau", deux à trois niveaux de métallisation seront réalisées. Pour garantir la fiabilité des circuits Subilo, des contraintes sont à respecter dans la réalisation des interconnexions :

- 1) Règles de dessin en vue de limiter la formation de topographies abruptes
- 2) Conditions des couches métalliques optimisées pour améliorer la continuité des interconnexions aux passages les plus abrupts.

Pour se libérer de ces contraintes, la solution est d'introduire dans le procédé actuel, une étape de planarisation. La qualité des produits sera améliorée et le procédé pourra être densifié.

1-2 Les techniques de planarisation

A) La planarisation par **BPSG** (Borophosphosilicate Glass) utilisée plus particulièrement dans les applications MOS (Métal-Oxyde-Semiconducteur) adoucit la surface {2,3}. L'inconvénient majeur de son utilisation est la haute température de fluage d'environ 900°C : elle est incompatible avec la partie bicouche du Subilo, l'aluminium ayant une température de fusion de 660°C. Un nouveau matériau composé d'ozone et de TEOS (Tetraethoxysilane) et déposé par CVD (Chemical Vapor Deposition), devrait permettre d'adoucir la topographie comme le BPSG avec l'avantage d'un fluage à 350°C seulement {4}. Mais la qualité de la couche formée est affectée par la présence importante de liaisons O-H.

B) Le **SOG** (Spin On Glass) est un polymère de type Silicate ($(\text{Si-O}_2)_n$) ou de type Siloxane ($(\text{R}_x\text{-Si-O}_y)_n$) dissout dans des solvants organiques tels que les alcools, les cétones ou les esters. Le premier SOG a été découvert en 1945 mais ce n'est que récemment qu'il est testé en tant que diélectrique. Pelliculé comme de la résine, il subit ensuite des étapes de densification à 425°C. Il est généralement utilisé en sandwich entre deux couches d'oxyde PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) et adoucit les angles de 90°C à 45°C {5,6}. D'après des travaux réalisés au Nat Lab (Laboratoire Philips à Eindhoven), le Silicate présente des micro-fissures pour des épaisseurs déposées de 220nm à 300nm {7}. Le Siloxane est beaucoup moins sensible à la formation de micro-fissures, mais il engendre de fortes résistances de contact entre les niveaux de métallisation. Ceci s'explique par la présence très abondantes de liaisons O-H dans le siloxane, qui contribue à la formation d'oxyde dans les contacts et détériore leur qualité {8}.

C) Par un dépôt d'oxyde par pulvérisation en deux étapes, on peut également planariser la surface. Il faut, dans le deuxième pas, utiliser une polarisation suffisamment élevée pour graver l'oxyde déposé sur les flancs. Mais ce type de dépôt est lent et engendre dans le substrat des dommages dus aux radiations générés par des électrons provenant de la cible. Ces défauts ont particulièrement été observés sur des transistors MOS {9,10,11} .

Cependant l'utilisation d'un dépôt d'oxyde plasma ECR polarisé (Electron Cyclotron Resonance) limiterait ces dommages tout en augmentant le throughput (nombre de plaques par heure) et en réduisant les angles {12}.

D) La technique appelée "etch-back" consiste à graver par exemple, par attaque ionique {13}, une couche de matériau que l'on vient de déposer, pour réduire la hauteur de marche. Une meilleure qualité de planarisation est obtenue en utilisant un matériau provisoire qui, pelliculé sur la plaque, planarisera la surface. Le résultat de planarisation dépendra alors des différences de vitesses de gravure entre le matériau provisoire et la couche à planariser. La gravure R.I.E. ou la gravure ionique sont utilisées pour cette technique de planarisation {14,15,16}. Classiquement, le matériau provisoire choisi est une résine, d'où la dénomination "Resist-Etch-Back" ou REB. C'est une technique dont le principe est simple mais qui ajoute des étapes de photolithographie et de dépôts supplémentaires.

Disposant de tous les équipements nécessaires, l'entreprise a favorisé le développement de la technique de planarisation par REB. Notre objectif est de déterminer si celle-ci peut être appliquée au procédé Subilo, pour améliorer la fiabilité des niveaux de métallisation et pour permettre sa densification future.

Cette technique a deux utilisations principales qui ont surtout été testées sur des circuits MOS :

- 1- la réalisation de l'isolation des transistors par un procédé BOX (Buried Oxide) remplaçant le procédé classique LOCOS (LOCAl Oxydation of Silicon) {17,18}.
- 2- la planarisation des couches de diélectrique entre les niveaux de métallisation {19,20}.

Dans le cadre de ce travail de thèse, nous nous intéressons plus particulièrement à l'application de cette technique REB aux circuits bipolaires. Il s'agit de développer et d'industrialiser un procédé de planarisation, compatible avec le procédé Subilo existant (SUBnanoseconde, Isolation par Oxyde Localisé), en vue d'augmenter la qualité de ses interconnexions.

1-3 Présentation des travaux

Le principe de la technique de planarisation par REB est représenté à la figure 1-3. Pour la planarisation d'une couche de diélectrique recouvrant un conducteur, la première opération consiste à déposer une couche de diélectrique d'une épaisseur supérieure à l'épaisseur du conducteur (Fig 3a). La surface est ensuite recouverte par un polymère qui, après des traitements bien spécifiques, flue et engendre un profil plan (Fig 3b). Enfin on réalise l'"etch-back" c'est-à-dire la gravure par plasma du polymère et du diélectrique à la même vitesse. Le profil plan du polymère est ainsi transféré au niveau de la couche du diélectrique (Fig 3c). Notre objectif est d'étudier et de mettre au point les étapes de fluage et d'etch-back, afin d'appliquer cette technique de planarisation REB au procédé de production Subilo.

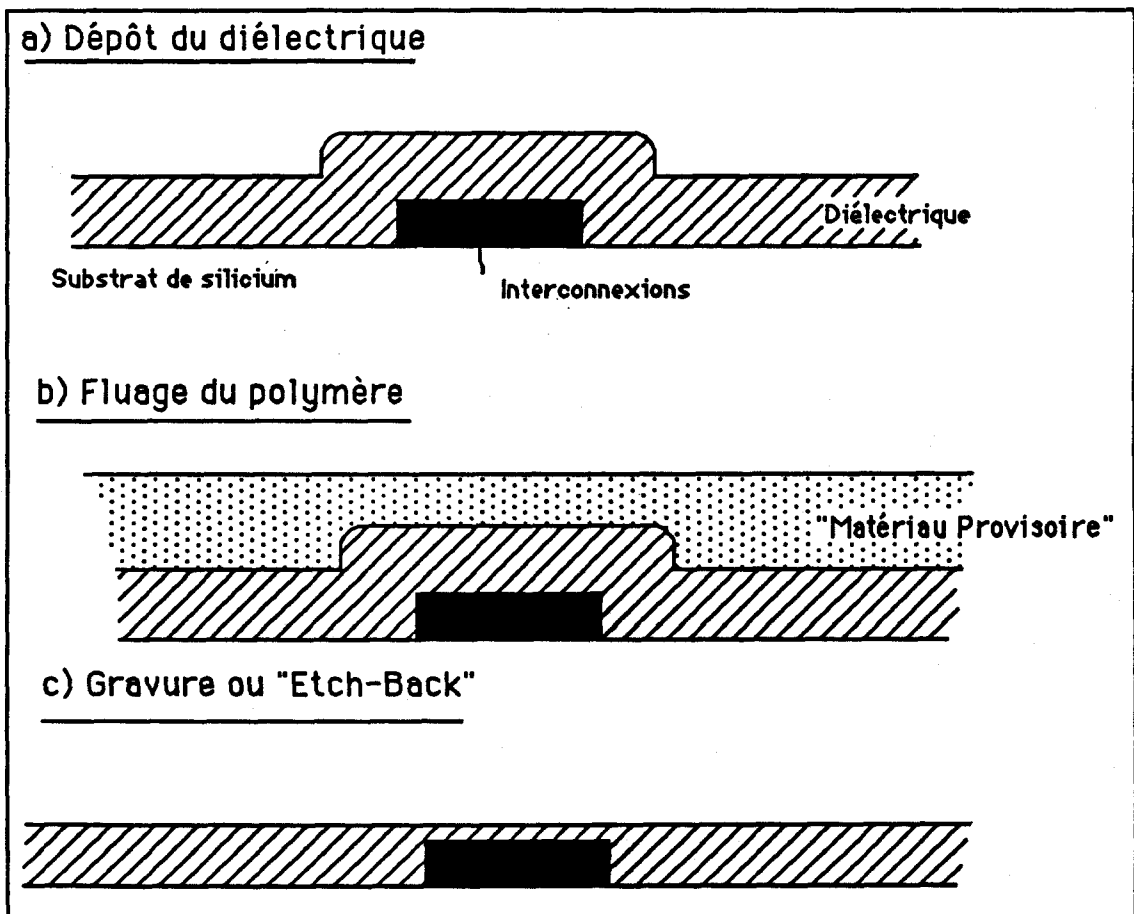


Figure 1-3 : Principe de la planarisation par etch-back

Dans le chapitre 2, nous étudierons le fluage d'un polymère. Nous déterminerons les conséquences d'un fluage parfait, puis à travers une théorie basée sur l'analyse des forces et avec le support des simulations numériques, nous définirons les limites du fluage. Au niveau expérimental, après l'optimisation du procédé de fluage, une caractérisation des épaisseurs de polymère, suivant la topologie, sera réalisée par un plan d'expérience.

Le chapitre 3 sera consacré au procédé d'etch-back. Le diélectrique étant dans notre application de l'oxyde de silicium, et le polymère une photorésine, nous présenterons dans un premier temps la gravure par plasma de ces deux matériaux. Expérimentalement, nous déterminerons ensuite les conditions qui permettent une gravure de l'oxyde et de la photorésine à des vitesses égales. Un plan d'expérience modélisera l'influence de paramètres physiques et chimiques sur les vitesses de gravure.

Le chapitre 4 présentera l'application de la planarisation par REB au procédé Subilo, destinée à améliorer la qualité des niveaux de métallisation. Nous vérifierons la faisabilité d'un procédé "Subilo planarisé", et définirons des paramètres topologiques en vue d'une industrialisation de l'étape de planarisation. Les résultats électriques du procédé planarisé seront comparés aux résultats du procédé classique : comparaison de la qualité du bicouche et tests de fiabilité sur des circuits réels. L'étape de planarisation sera introduite dans le procédé si elle vérifie les deux critères suivants :

- 1) Pas de modifications des performances actuelles du Subilo.
- 2) Bonne maîtrise de l'étape de planarisation

CHAPITRE 2

LE FLUAGE DES POLYMERES

2-1 Introduction

Pour planariser une surface comportant une topologie complexe, on utilise un polymère qui, dissous dans un solvant, a les caractéristiques d'un fluide visqueux. Dispensé sur toute la plaque en rotation, il recouvre uniformément toute la surface, puis doit subir des traitements particuliers, (traitements thermiques...), pour fluer au maximum et combler toutes les aspérités. L'objectif sera alors d'effectuer l'etch-back afin de recopier le profil plan obtenu avec le polymère au niveau de la couche de diélectrique. Toutes irrégularités de fluage seront retranscrites dans la couche à planariser. Pour optimiser la qualité de la planarisation, il est donc nécessaire d'étudier l'étape de fluage.

Prenant l'hypothèse d'une planarisation parfaite de la surface par un polymère, nous en déterminerons les conséquences sur la variation maximale d'épaisseur de ce polymère. Puis, nous étudierons le mécanisme de fluage du polymère à partir des équations de Navier Stokes régissant le mouvement des fluides. Par des simulations numériques, nous illustrerons le phénomène de fluage et nous mettrons en évidence l'influence de la topologie initiale sur la qualité du fluage.

Expérimentalement, le procédé de fluage sera mise au point pour la résine photosensible HPR204. Ensuite par la méthode des plans d'expériences, nous modéliserons les caractéristiques de la couche de résine en fonction des paramètres topologiques.

2.2 Hypothèse d'un fluage idéal

L'objectif est de déterminer les épaisseurs de polymère en fonction de la topologie pour un fluage idéal.

2.2.1 Définition des paramètres

Le motif de base est présenté à la figure 2-1. Les interconnexions d'aluminium ont une largeur L_w et sont espacées de L_s . L'épaisseur de l'aluminium est H_m créant des hauteurs de marches à planariser de la même valeur. Toute la surface est ensuite recouverte d'une couche d'oxyde d'épaisseur E_{ox} . Après les étapes de pelliculage et de fluage, le couche de polymère a une épaisseur nominale E_{res0} . On note les épaisseurs de polymère sur le haut des motifs et entre les motifs respectivement : E_{res1} et E_{res2} . La qualité du fluage est appréciée à travers le calcul des dénivellations au bord D_b et au centre D_c . Les taux de planarisation au bord T_b et au centre T_c sont définis par :

$$T_b = (1 - D_b/H_m) \quad (\%)$$

$$T_c = (1 - D_c/H_m) \quad (\%)$$

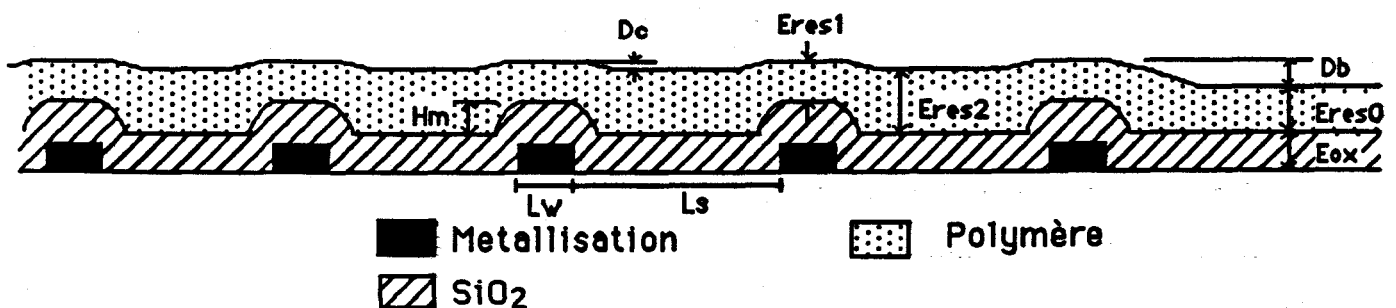


Figure 2-1 : Schématisation de la topographie

2.2.2 Détermination des épaisseurs de polymère suivant la topologie

Sur des motifs d'aluminium d'épaisseur H_m , nous pelliculons une épaisseur de polymère E_{res0} . Le fluage étant idéal, nous prenons les hypothèses de base suivantes :

- après le fluage du polymère, la surface est totalement plane,
- le polymère a une densité volumétrique constante et indépendante de la topographie.

Il suffit alors d'appliquer le théorème de remplissage des volumes {1}, pour déterminer les épaisseurs de polymère E_{res1} et E_{res2} suivant la topologie.

2.2.2.1 Cas d'un réseau de conducteurs

Pour étudier les épaisseurs de polymère reposant sur un réseau de conducteurs, nous nous limitons à une période du réseau ramenée à une unité (Figure 2-2). Soit l'espacement entre conducteurs L_s , et leur largeur $(1 - L_s)$, les épaisseurs de polymère E_{res1} et E_{res2} se définissent par les équations suivantes :

$$E_{res1} = E_{res0} - H_m.L_s \quad (2-1)$$

$$E_{res2} = E_{res0} + H_m.(1 - L_s) \quad (2-2)$$

Si nous plaçons sur une période plusieurs conducteurs, l'équation devient:

$$E_{res1} = E_{res0} - H_m(\sum_{i=1}^n L_{s_i}) \text{ et } E_{res2} = E_{res0} + H_m(1 - \sum_{i=1}^n L_{s_i}) \quad (2-3)$$

avec L_{s_i} espacement entre la bande i et la bande $i+1$

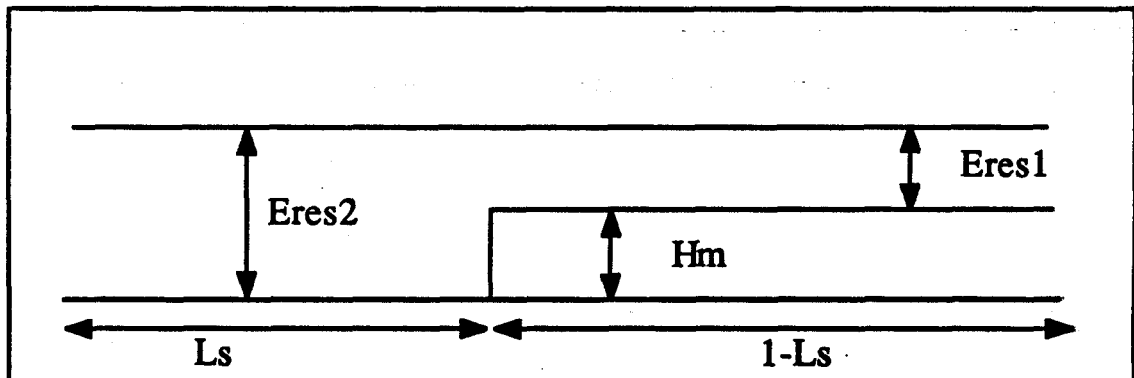


Figure 2-2 : Motif Unitaire

2.2.2.2 Autres motifs : plots, conducteurs isolés

Nous pouvons étendre les équations 2-1 et 2-2 définies pour des réseaux d'interconnexions (r) à des motifs particuliers telsque les bandes isolées (b) et les plots (p). Les épaisseurs de polymères sur chacun de ces motifs se déterminent alors par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} \text{Eres1}(r) &= \text{Eres0} - \text{Hm} \left(\sum_{i=1}^{\wedge} \text{Ls}_i \right) \text{ et,} \\ \text{Eres2}(r) &= \text{Eres0} + \text{Hm} \left(1 - \sum_{i=1}^{\wedge} \text{Ls}_i \right) \quad (2-4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Eres1}(p) &= \text{Eres0} - \text{Hm} \left(\lim_{\text{Ls} \rightarrow 0} \left(\sum_{i=1}^{\wedge} \text{Ls}_i \right) \right) = \text{Eres0} \text{ et,} \\ \text{Eres2}(p) &= \text{Eres0} + \text{Hm} \left(\lim_{\text{Ls} \rightarrow 0} \left(1 - \sum_{i=1}^{\wedge} \text{Ls}_i \right) \right) = \text{Eres0} + \text{Hm} \quad (2-5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Eres1}(b) &= \text{Eres0} - \text{Hm} \left(\lim_{\text{Ls} \rightarrow 1} \left(\sum_{i=1}^{\wedge} \text{Ls}_i \right) \right) = \text{Eres0} - \text{Hm} \text{ et,} \\ \text{Eres2}(i) &= \text{Eres0} + \text{Hm} \left(\lim_{\text{Ls} \rightarrow 1} \left(1 - \sum_{i=1}^{\wedge} \text{Ls}_i \right) \right) = \text{Eres0} \quad (2-6) \end{aligned}$$

On constate que :

- 1) L'épaisseur de polymère Eres1 est minimale sur des lignes étroites et isolées (Equation 2-6), et elle est maximale sur des plots d'aluminium (Equation 2-5).
- 2) Pour le réseau, plus la densité des interconnexions augmente et plus les espacements diminuent (Ls décroît). L'épaisseur de polymère Eres1(r) et Eres2(r) croît alors linéairement comme le montre la courbe de la figure 2-3 ci-dessous:

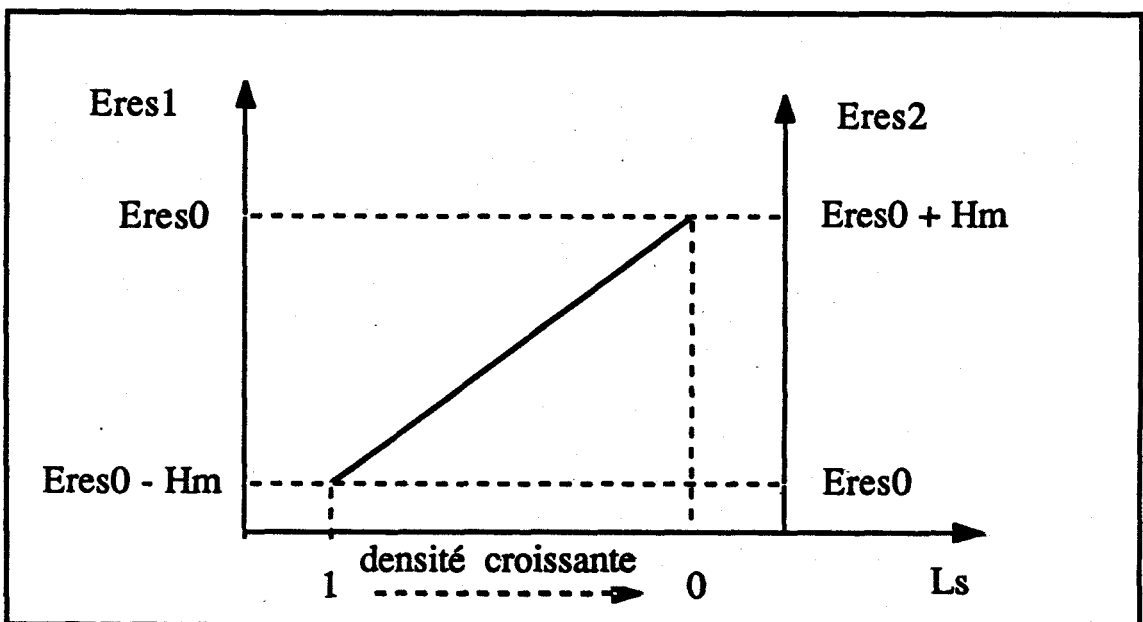


Figure 2-3 : Evolution de Eres1 et de Eres2 en fonction de la densité du réseau Ls

Des résultats obtenus expérimentalement {2}, par des mesures sur plaques au profilomètre, sont reportés en figure 2-4. Ils confirment l'influence de la densité de la topologie sur l'épaisseur du polymère : plus le réseau est dense et plus l'épaisseur Eres2 est importante.

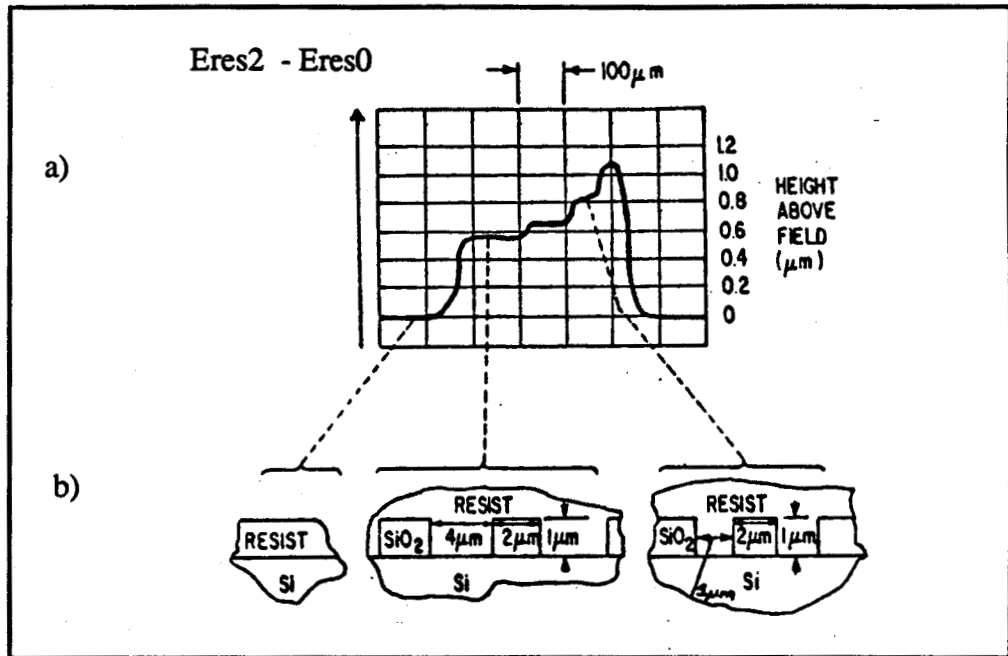


Figure 2-4 : Profil après fluage de la résine HPR204

Courbe de profilomètre (a) - Structure des motifs (b)

(article de Wilson et Piacente {2})

2.2.3 Conséquence théorique d'un fluage idéal sur la couche de diélectrique

Supposons que l'etch-back soit idéal, les vitesses de gravure de l'oxyde et du polymère sont donc égales. Une surface totalement plane sera alors obtenue en gravant toute la couche de polymère.

L'épaisseur maximale de polymère à graver se situe dans les réseaux les plus denses, entre les conducteurs d'aluminium. Nous avons :

$$\lim_{L_s \rightarrow 0} (Eres2(r)) = Eres0 + Hm = Eresmax \quad (2-7)$$

En gravant toute l'épaisseur de polymère située entre les conducteurs dans les réseaux (Eres2max), nous attaquons l'épaisseur de diélectrique reposant sur les motifs d'aluminium. Aux endroits où l'épaisseur de polymère (Eres1) est initialement la plus faible, nous graverons une épaisseur de diélectrique considérable.

L'épaisseur de polymère minimale est localisée sur des bandes isolées et étroites. Elle est définie par :

$$\lim_{L_s \rightarrow 1} (Eres1(i)) = Eres0 - Hm = Eresmin \quad (2-8)$$

Comme le présente la figure 2-5, sur ces bandes étroites et isolées, l'épaisseur de diélectrique gravée correspondra alors à :

$$\begin{aligned} (Eresmax - Eresmin) &= (Eres2max - Eres1min) \\ &= Hm - (Eres1max - Eres1min) = 2Hm \quad (2-9) \end{aligned}$$

Si l'épaisseur de diélectrique déposée initialement est insuffisante, après l'etch-back, le niveau de l'oxyde descendra en dessous de celui de l'aluminium, et générera des marches. Par conséquent et en conclusion, pour ne pas créer de nouvelle marche d'aluminium, il faut théoriquement déposer une couche de diélectrique d'une épaisseur minimum de 2Hm.

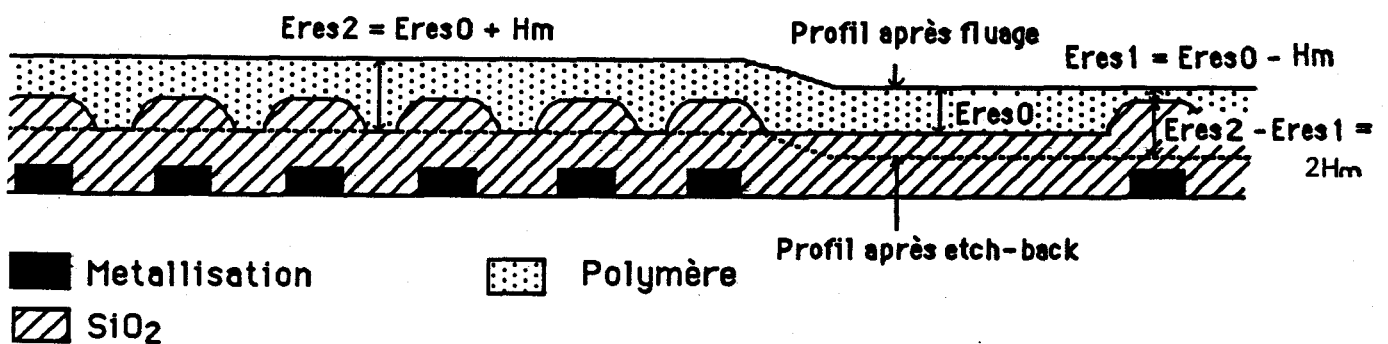


Figure 2-5 : Profils de la surface après fluage d'un polymère et après un etch-back idéal

2.3 Le mécanisme de fluage

2.3.1 Introduction

Par évidence expérimentale, et contrairement aux hypothèses de la partie précédente, la planarisation n'est pas parfaite. Le polymère dissous dans un solvant est pelliculé sur la plaque en rotation. La qualité de fluage dépend des caractéristiques de la solution pelliculée (viscosité, quantité de solvant, pourcentage de solide), des conditions de pelliculage, des traitements effectués, et, comme nous allons le voir, de la topographie du substrat.

De nombreux modèles théoriques ont été développés.

Le premier modèle {3} concerne le pelliculage d'une surface plane. Il permet de prévoir par exemple :

- 1) que l'épaisseur finale de la couche pelliculée dépend :
 - du pourcentage de solide initialement contenu dans la solution
 - de la viscosité initiale de la solution
 - et de la volatilité du solvant
- 2) que l'épaisseur est inversement proportionnelle au carré de la vitesse de rotation.

Overdiep et Peter C. Sukanek {4} ont étudié le pelliculage sur une topographie rugueuse. Leur modèle, basé sur la conservation des masses et des moments montre que le profil après pelliculage peut être plan ou conforme à la topographie initiale. La tension de surface tend à planariser le matériau pelliculé et le gradient de tension tend à le rendre plus conforme à la topologie.

Notre objectif dans ce rapport, n'est pas de définir un autre modèle théorique complet mais de mettre en évidence les paramètres physiques et chimiques importants dans le processus de fluage. Déterminant le phénomène de fluage à partir des équations de Navier Stokes, nous réaliserons des simulations numériques. Ces dernières nous permettront une analyse qualitative de l'influence de la topologie sur la qualité de la planarisation.

2.3.2 Théorie du mécanisme de fluage

Pendant le pelliculage le fluide est soumis à des forces externes : la force de gravitation, la force centrifuge et la force de capillarité relative aux tensions de surface. Plus la force centrifuge est importante et plus la couche pelliculée est conforme à la topographie. Au contraire, les forces de capillarité et de gravité tendent à planariser la surface.

Après le pelliculage, compte tenu des forces centrifuges importantes, le profil du matériau est considéré conforme à la topographie. Les forces de gravité et de capillarité vont ensuite modifier le profil. Nous pouvons alors écrire l'équation de conservation du moment de Naviers Stokes qui régit le mouvement d'un fluide :

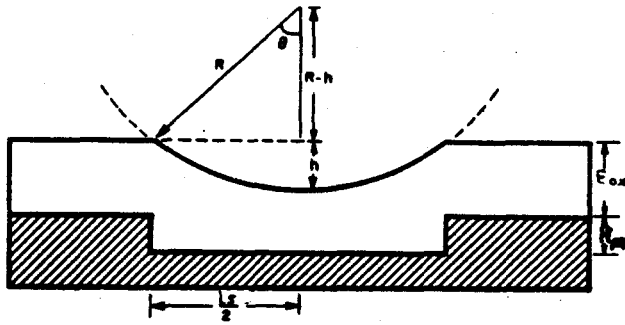
$$\rho \, DV / Dt = \sum F = F_{\text{grav}} + F_{\text{cap}} \quad (2-10)$$

où ρ densité volumétrique du fluide, V vitesse du fluide, F_{grav} et F_{cap} forces de gravité et de capillarité par unité de volume.

Reprenant l'exemple de L.E. Stillwagon {5}, nous cherchons à évaluer chacun des termes de l'équation 2-10. Soit un substrat comportant un creux de largeur L_s , de hauteur H_m et recouvert d'une couche de polymère d'épaisseur E_{res0} dont le profil est présenté en figure 2-6. Les pressions exercées sur le polymère sont celles engendrées par les forces de capillarité (P_{cap}) et de gravité (P_{grav}). La pression de capillarité tend à réduire le rayon de courbure et entraîne le fluide à combler le creux. De même, la pression de gravité tend également à planariser la surface. Les pressions sont définies respectivement par :

$$P_{\text{cap}} = \gamma / R = 8 \cdot \gamma \cdot H_m / L_s^2 \quad \text{et} \quad P_{\text{grav}} = \rho \cdot g \cdot H_m$$

où R est le rayon de courbure du profil de polymère, γ est la tension de surface, ρ est la densité et g est l'accélération de la pesanteur.



Pour $L_s \gg H_m$ $R = L_s^2/8H_m$

Figure 2-6 : Schématisation d'un profil de polymère recouvrant un creux de largeur L_s

Prenant des valeurs typiques pour γ , ρ , H_m , L_s de 30dyn/cm , 1g/cm^3 , $1\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$, P_{cap} vaut 6000dyn/cm^2 soit 600Pa , tandis que P_{grav} n'exécède pas $1 \cdot 10^{-2}\text{Pa}$. Par une analyse plus complète, L.E. Stillwagon montre d'ailleurs que la force de capillarité domine la force de gravité pour des creux dont la largeur est inférieure à $5000\mu\text{m}$. Dans notre domaine de travail, les motifs ayant des dimensions inférieures à $300\mu\text{m}$, le fluide est donc principalement soumis à la force de capillarité.

Soit P la pression de surface exercée sur le fluide, ou pression de capillarité, les équations du mouvement de Navier-Stokes s'écrivent alors dans un espace à deux dimensions {6} :

$$\frac{\partial P}{\partial x} = 2 \mu \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 V_y}{\partial y \partial x} + \frac{\partial(\lambda \text{div } V)}{\partial x} \quad (2-11)$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = 2 \mu \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 V_x}{\partial x \partial y} + \frac{\partial(\lambda \text{div } V)}{\partial y} \quad (2-12)$$

où μ est la viscosité dynamique, et λ , associé seulement à la dilatation d'un volume, est appelé "coefficient de viscosité de volume".

Dans notre application, il est raisonnable de considérer que le polymère utilisé est un fluide incompressible. Nous pouvons donc écrire :

$$\text{div } \mathbf{V} = 0 \text{ soit } \partial V_x / \partial x + \partial V_y / \partial y = 0$$

Dans cette hypothèse, les équations de Navier-Stokes se réduisent à :

$$\partial P / \partial x = \mu [\partial^2 V_x / \partial x^2 + \partial^2 V_x / \partial y^2] \quad (2-13)$$

$$\partial P / \partial y = \mu [\partial^2 V_y / \partial y^2 + \partial^2 V_y / \partial x^2] \quad (2-14)$$

Les équations 2-13 et 2-14 montrent que la vitesse du fluide est proportionnelle au rapport de la tension de surface sur la viscosité (γ/μ). Par conséquent, le temps nécessaire au fluage est inversement proportionnel à ce rapport γ/μ .

2.3.3 Simulations numériques

2.3.3.1 Présentation du simulateur IMPACT4

Le simulateur de procédé IMPACT4 consiste en un programme 2D capable de simuler des procédés multicouches bipolaires avancés, comportant deux niveaux de polysilicium, des émetteurs polycristallins et des isolations sous forme de tranchées [7]. Etant donné la complexité des structures multicouches à prendre en compte, la génération de maillage est un point clé concernant la discrétisation spatiale du domaine de simulation. Elle utilise la méthode des éléments finis et elle est définie par des éléments triangulaires à trois noeuds. Pour toutes les étapes élémentaires intervenant dans la fabrication des composants (dépôt, gravure, implantation ionique, diffusion, oxydation, et épitaxie), l'évolution des profils des couches superficielles et des dopants est calculée à partir de modèles propres à chacune des étapes. Le procédé terminé, les profils des dopants sont bien définis et le résultat de simulation de procédé peut être repris par un simulateur de dispositif, afin de déterminer les caractéristiques électriques des transistors correspondants.

2.3.3.2 Illustration du fluage d'un polymère

Le fluage d'un fluide est étudié en observant la déformation d'une marche, de hauteur 850nm, dont le maillage uniforme est présenté à la figure 2-7a. La modélisation est basée sur la résolution des équations de Navier-Stokes (2-13 et 2-14) définissant l'écoulement d'un fluide visqueux incompressible. Le même type de modèle est utilisé dans la simulation de l'oxydation humide en intégrant en plus la diffusion des agents oxydants {8}. Pour ces simulations, nous utilisons la méthode des éléments finis et la condition d'incompressibilité est obtenue par des itérations sur la pression et la vitesse, d'après l'algorithme d'Ozawa.

Soumis à une tension de surface γ , l'évolution du profil du fluide de viscosité μ est illustrée à la figure 2-7b. La pression est positive dans les parties convexes et elle est négative dans les parties concaves. Par conséquent, elle a pour effet de réduire les rayons de courbure.

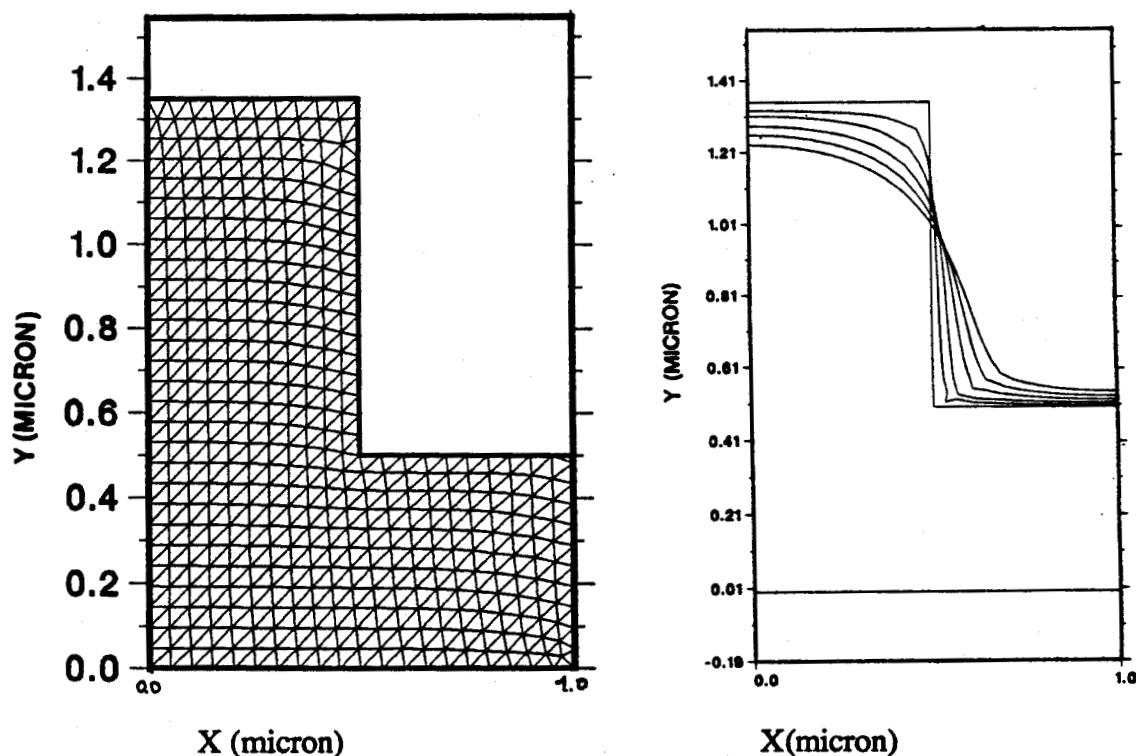


Figure 2-7 : Présentation d'une marche de polymère

(a) le maillage - (b) l'évolution du profil au cours du fluage - $t = 5\text{min}$ et $\gamma/\mu = 10^{10}$

2.3.3.3 Influence des largeurs entre conducteurs sur la qualité du fluage

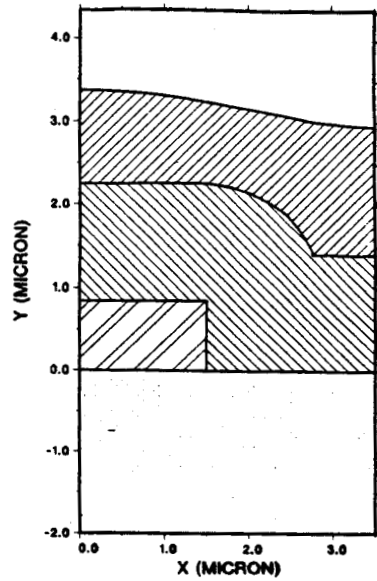
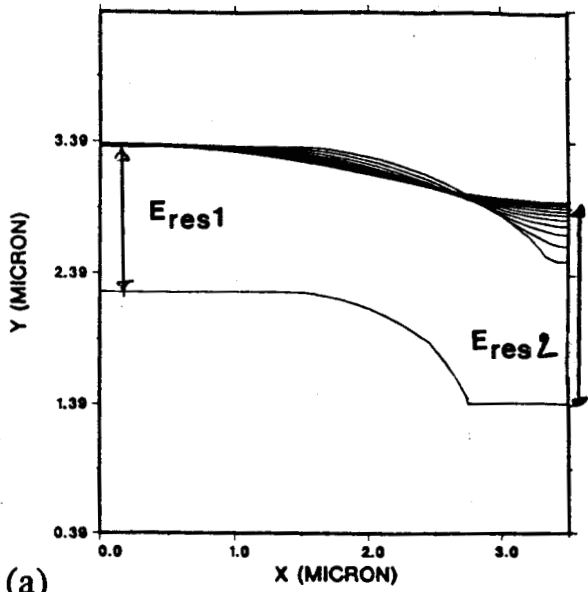
Avec le programme 2D d'IMPACT4, on définit sur une demi-période un réseau de bandes d'aluminium de 850nm d'épaisseur. L'ensemble est recouvert d'un oxyde de 1400nm d'épaisseur et d'un fluide de 1100nm d'épaisseur. Les simulations sont effectuées pour des réseaux comportant des lignes de largeur de 3 μ m et des creux variant de 4, 5 à 8 μ m. D'après les résultats de simulations après 50 minutes de fluage, illustrés à la figure 2-8, nous observons que, pour des creux de 4 μ m de large, l'épaisseur de résine Eres2 est maximale et la dénivellation minimale. En conclusion, plus les motifs sont denses, plus ils sont faciles à planariser par un polymère. Pour $L_s=8\mu$ m, la dénivellation est maximale mais le profil de la résine reste doux..

L'évolution des dénivellations en fonction du temps de fluage est donnée à la figure 2-9. Plus on augmente le temps de fluage et plus la dénivellation diminue.

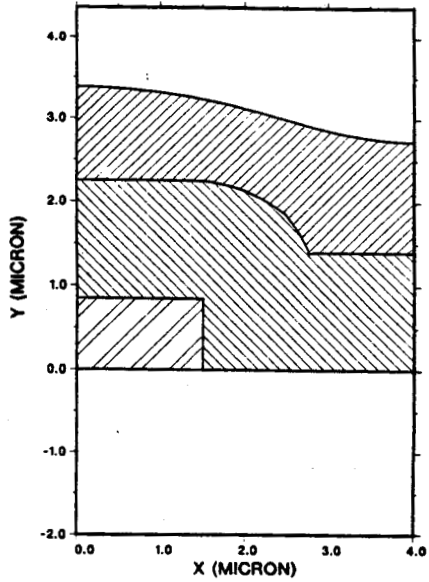
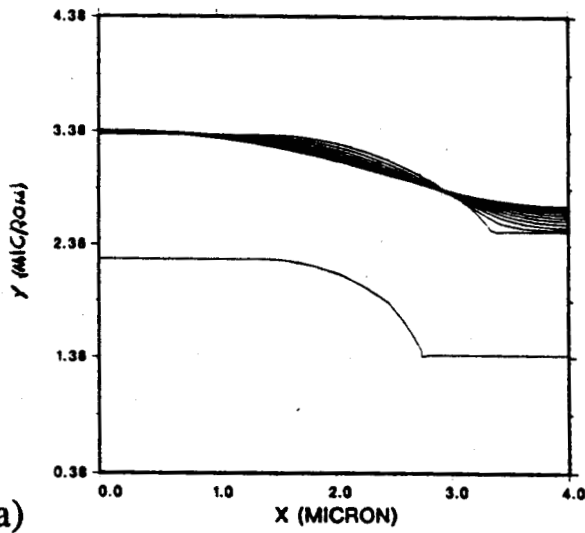
Ce temps est inversement proportionnel au rapport γ / μ . Il s'agit donc d'optimiser ce rapport en minimisant la viscosité par des traitements adéquats. Mais, il faut également laisser le temps au polymère de fluer avec cette valeur de viscosité. Stillwagon a d'ailleurs défini théoriquement un paramètre appelé "leveling time", déterminant le temps nécessaire pour planariser un espace donné suivant les caractéristiques du fluide.

2.3.3.4 Influence de la largeur des conducteurs sur la qualité du fluage

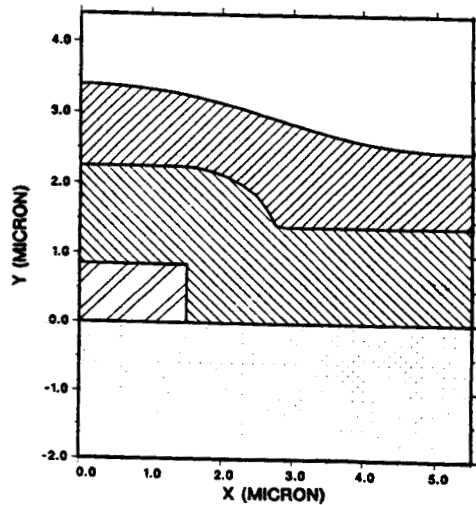
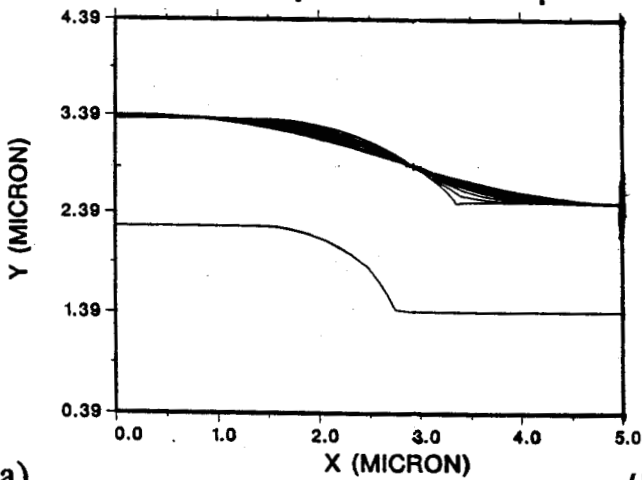
A partir d'un modèle empirique sur le pelliculage de la surface, L.K. White {9,10,11} montre que la qualité du fluage, et par conséquent les épaisseurs de polymère, varient suivant la largeur des conducteurs. Exprimer la topologie du substrat en terme de séries de Fourier, il recouvre la surface par un polymère et soumet le profil de celui-ci à un filtre passe bas, caractéristique du polymère et des conditions de pelliculage utilisées. La figure 2-10 présente les résultats des simulations obtenues sur des bandes isolés de largeur variant de 1 μ m à 40 μ m et espacées de 100 μ m. Nous observons que plus le conducteur est large et plus il est difficile à planariser, cependant plus il est étroit, plus l'épaisseur de résine Eres1 est faible.



(a)
Réseau 1 : $L_w = 3 \mu\text{m}$ et $L_s = 4 \mu\text{m}$



(a)
Réseau 2 : $L_w = 3 \mu\text{m}$ et $L_s = 5 \mu\text{m}$



(a)
Réseau 3 : $L_w = 3 \mu\text{m}$ et $L_s = 8 \mu\text{m}$

Figure 2-8 : Evolution des profils d'un fluide après 50 minutes de fluage (chaque ligne $t = 5 \text{min}$)
(a) : Evolution du profil - (b) : Profil final

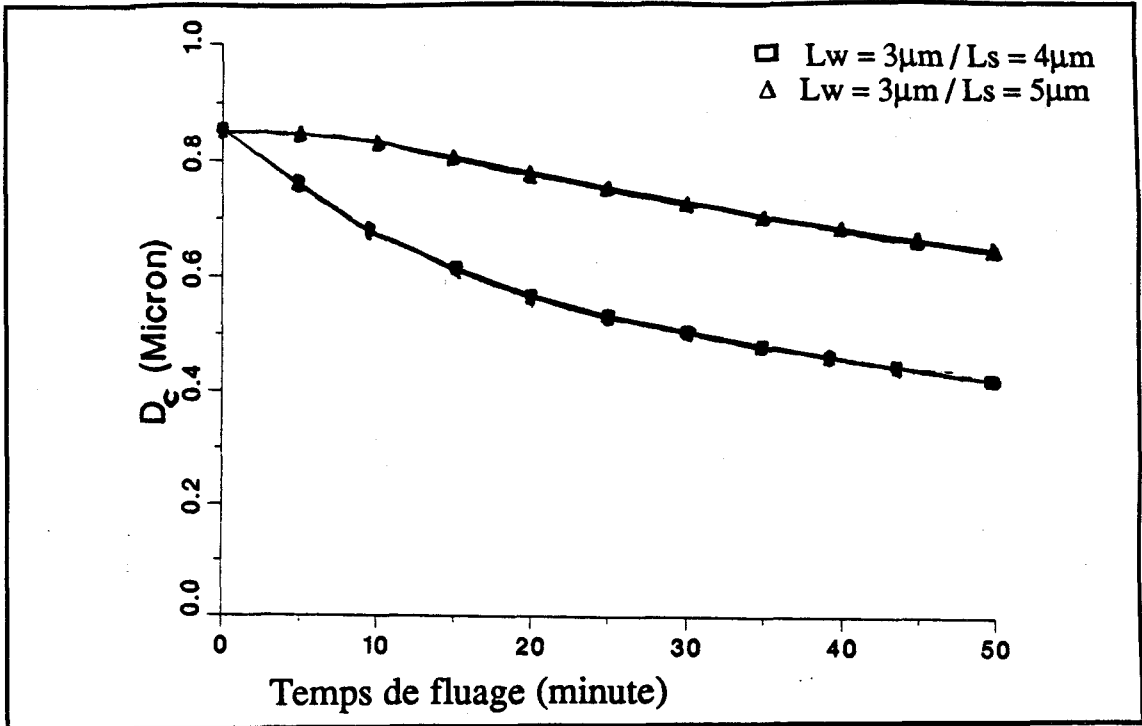


Figure 2-9 : Evolution des dénivellations en fonction du temps de fluage

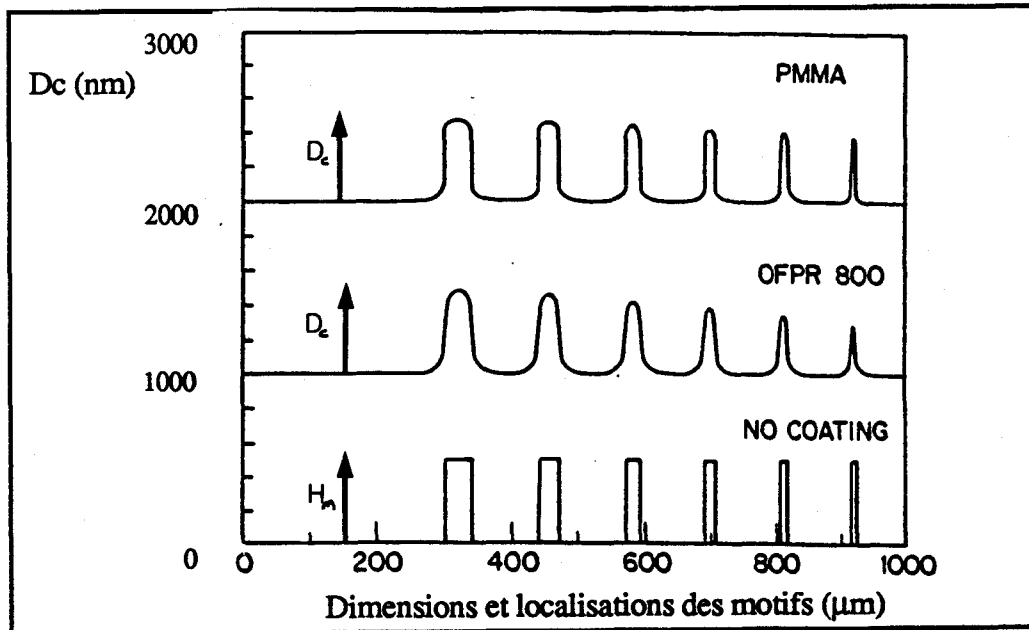


Figure 2-10 : Propriétés de planarisation simulées pour des lignes isolées pour deux polymères (L.K.White {10}) : - PMMA (Polyméthyl-méthacrylate) 870nm
- OFPR 800 (Résine Positive) 930nm

En conclusion, les motifs les plus difficiles à planariser sont les motifs larges et très espacés. Cependant pour optimiser la qualité du fluage par un polymère, il faut minimiser la valeur de la viscosité et maximiser la durée du fluage.

2.4 Développement d'un procédé de fluage

2.4.1 Les procédés existants

Nous venons de voir dans les Parties 2-2 et 2-3 que, quelque soit la qualité du fluage, les épaisseurs de polymère varient énormément suivant la taille des motifs. Ces variations, au cours de l'étape d'etch-back, se répercuteront dans la couche de diélectrique.

Pour palier à ce problème, diverses solutions sont proposées :

A) A. Schiltz et M. Pons {12} propose un procédé appelé TLP (Two-Layer Planarization) qui utilise deux couches de résine et une étape de photolithographie. Le principe consiste à combler tous les espaces entre motifs par de la résine. Il nécessite une première étape de photolithographie supplémentaire utilisant un masque inverse du masque de définition des métallisations. Une deuxième couche de résine planarise ensuite parfaitement la surface. Les épaisseurs de résine sont alors indépendantes de la topologie, mais les difficultés de cette méthode concernent :

- l'alignement des deux masques : masque réel et masque inverse
- la mauvaise adhérence d'une résine sur une autre entraînant l'apparition d'ondulations en surface {13}.

B) Pour résoudre le problème d'ondulations, il est possible de rajouter une couche d'oxyde entre les deux couches de résine comme dans le procédé P.R.O.R.P.S. (Planarization with Resist / Oxide / Resist and PolySilicon) {14}.

Ces deux procédés peuvent améliorer les résultats d'une planarisation par REB (Resist Etch Back) mais leur complexité limite leur utilisation en production. Nous garderons donc un procédé de fluage simple ne comportant qu'une couche de polymère, même si ce procédé présente des imperfections.

Après avoir choisi le polymère, nous optimiserons le procédé de fluage. Une caractérisation complète des épaisseurs du polymère en fonction de la topologie sera ensuite réalisée.

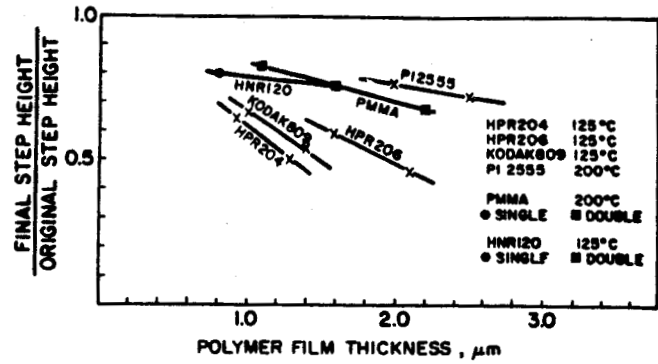
2.4.2 Choix du polymère

Nous avons vu dans la Partie 2-3 que la viscosité était un paramètre déterminant dans le phénomène de fluage. Mais l'évaporation, par exemple pendant le pelliculage, modifie cette viscosité. Or, le taux d'évaporation dépend du solvant, de la concentration de composés solides et de la vitesse de pelliculage. Pour choisir le polymère, nous nous baserons donc sur des résultats de planarisation expérimentaux.

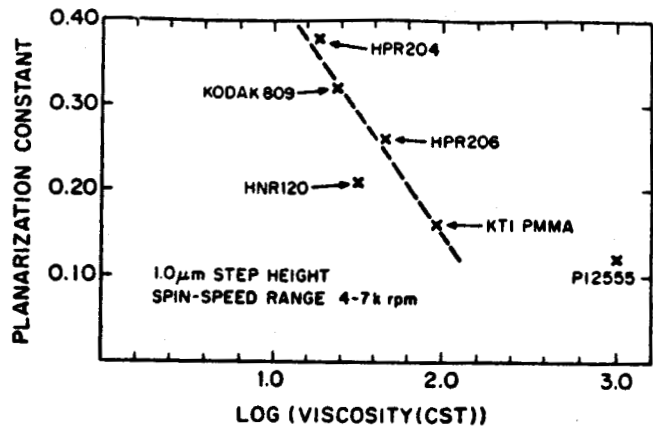
L.K. White {15} a comparé la qualité de la planarisation de six polymères différents dont les propriétés sont données dans le tableau de la figure 2-11. La figure 2-12a montrent les taux de planarisation obtenus pour différents polymères et pour des épaisseurs variant dans leur plage d'utilisation. Plus la couche est épaisse, meilleure est la planarisation. L.K. White s'est affranchi du paramètre épaisseur en définissant une constante de planarisation correspondant à la pente de la droite. Représentant alors la courbe des constantes de planarisation des différents polymères en fonction du logarithme de leur viscosité, il montre que tous les points passent par une droite excepté pour le polymère HNR120. Par conséquent, plus la viscosité est faible, meilleure est la qualité de la planarisation. Malgré l'évaporation au cours du procédé de fluage, la viscosité est un bon indicateur des propriétés de planarisation d'un polymère.

	% Solids	Viscosity	Specific gravity	Solvent system
HPR204	27.8%	18.5 cps	1.036	Cellosolve acetate
HPR206	33.0%	43 cps	1.055	Cellosolve acetate
HNR120	13.5%	31 cps	0.870	Xylene
Kodak 809	32%	23 cSt	1.045	Cellosolve acetate
KTI PMMA 496k	9%	90 cSt	—	Chlorobenzene
PI2555 Dupont polyimide	20%	1,000 cps	1.060	n-methyl-2-pyrrolidone

Figure 2-11 : Propriétés des polymères (Données des producteurs)
(cps ou centipoise = unité de la viscosité dynamique μ)
(cSt ou centiStokes = unité de la viscosité cinématique $\nu = \mu/\rho$)



Spun-on planarization properties vs. polymer film thickness for 20 μm isolated line feature and a one micron polysilicon step height.



a)

b)

Figure 2-12 : Comparaison de différents polymères d'après L.K. White {15}

a - les taux de planarisation en fonction de l'épaisseur du polymère

b - la constante de planarisation en fonction du log de la viscosité

La résine photosensible HPR204 a une viscosité initiale de 18,5cps. Soit, la plus faible de tous les polymères testés par L.K.White. Considérée comme ayant de bonnes propriétés de planarisation, et utilisée couramment par l'entreprise pour les étapes de photolithographie, la résine HPR204 est sélectionnée comme polymère pour le procédé de planarisation.

2.4.3 Les moyens de développement

2.4.3.1 Présentation des équipements utilisés

Nous disposons d'équipements automatiques (Eaton-Canon) qui permettent de réaliser des opérations de pelliculage, de recuit sur plateau chauffant, et d'exposition de la résine photosensible HPR204. Des étuves ventilées sous azote peuvent également être utilisées pour effectuer des étapes de recuit.

2.4.3.2 Préparation des plaques

Le procédé de fluage sera développé sur des plaques de silicium de 125mm de diamètre, sur lesquelles les étapes suivantes ont été réalisées :

- Oxydation de 450nm
- Dépôt métallique par pulvérisation (TiW - 200nm ; AlSiCu - 650nm)
- Photolithographie
- Gravure humide ou par plasma de la couche métallique *
- Dépôt de 1400nm d'oxyde plasma PECVD dopé phosphore 3%

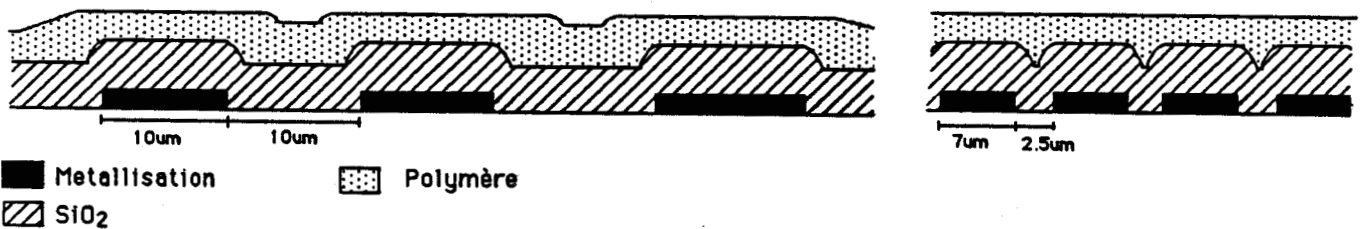
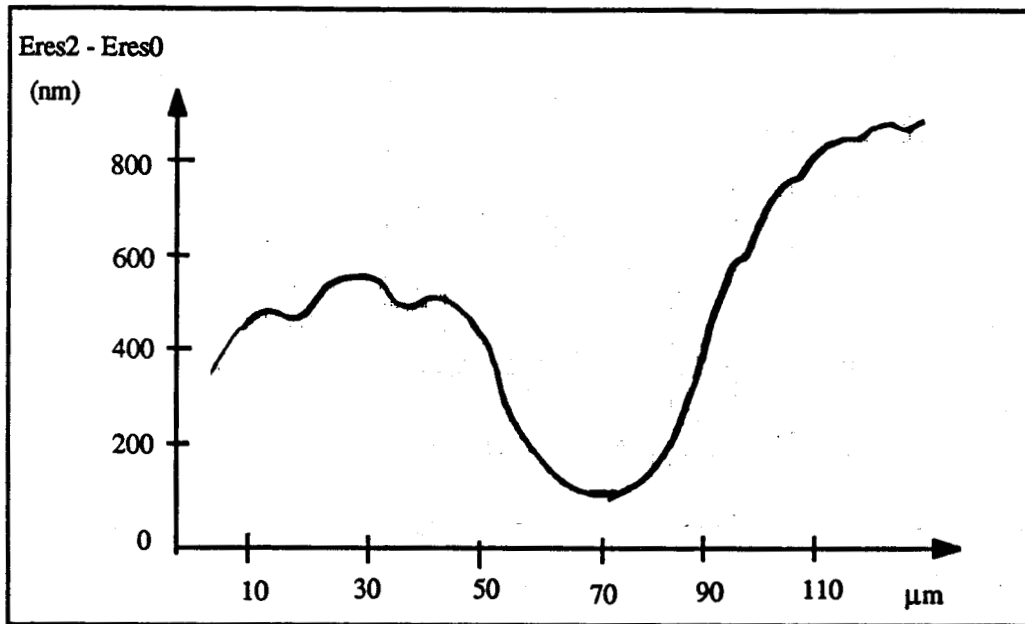
*Gravure humide isotrope ou Gravure par plasma anisotrope dans un réacteur R.I.E. (Réactive Ion Etching) avec angles de 70° à 90°.

2.4.3.3 Les instruments de caractérisation

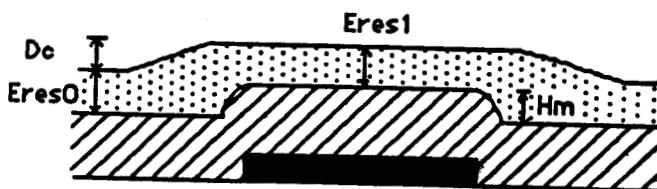
Nous disposons de deux instruments permettant de caractériser le profil et les épaisseurs de résine :

- 1- Le MEB (Microscope Electronique à Balayage) permet l'observation en coupe des différentes couches reposant sur le substrat de silicium.. Le profil et les épaisseurs de la couche de résine peuvent ainsi être analysés. Cette technique est destructive, et elle devient délicate lorsqu'il s'agit de couper dans un motif particulier. De plus, la résine se charge sous l'effet du bombardement des électrons, lors de la visualisation, et entraîne parfois une mauvaise définition des couches.
- 2- Le profilomètre Dektak détermine le profil de la surface après le fluage de la résine. Une pointe de 12,5µm de diamètre balaye la surface de la plaque sur 200µm à 900µm et enregistre des dénivellations ne dépassant pas, dans notre application, 850nm. La représentation se fait alors à une échelle d'environ 1:1000. La qualité de la planarisation, liée à la douceur des pentes, est donc difficilement quantifiable à une telle échelle.

Par contre, l'enregistrement au profilomètre servira à mesurer des écarts d'épaisseurs de résine reposant sur différents motifs et à déterminer également l'épaisseur Eres1 reposant sur des motifs isolés.



a)



b)

$$\text{Eres1 (i)} = \text{Eres0} - \text{Hm} + \text{Dc}$$

Figure 2-13 : Exploitation d'enregistrements au profilomètre

a) Evaluation de Eres1 entre deux motifs

b) Détermination de Eres1 sur un motif isolé

2.4.4 Présentation du procédé de base

La résine HPR204 est pelliculée sur des plaques préparées comme indiqué dans la partie 2.4.3.2. La vitesse de rotation utilisée pour cette résine est classiquement de 4100tr/mn et l'épaisseur nominale de la résine est alors de 1300nm. En dessous de cette vitesse, l'uniformité de la couche de résine n'est plus assurée.

Comme dans toutes les étapes de photolithographie, après le pelliculage, la résine est séchée sur un plateau chauffé à 100°C, pendant 50 secondes, afin d'évaporer une partie des solvants : c'est le "Softbake". Les autres traitements, tels que l'exposition et le second recuit appelé "hardbake", seront déterminés dans les paragraphes suivants.

2.4.5 Influence de l'exposition

Après avoir réalisé le pelliculage et le premier recuit à 100°C sur deux plaques, l'une d'entre elles est exposée aux rayons U.V. avec une énergie de 100mJ/cm². Les courbes, figure 2-14, obtenues au profilomètre, montrent que l'exposition de la photorésine HPR204, améliore la qualité de la planarisation.

La photorésine HPR204 comporte un composé photoactif PAC (PhotoActif Compound) qui limite son fluage. D'après A. Schiltz [16], les réactions entre ce composé et la résine entraînent des liens supplémentaires :

- entre deux molécules PAC
- entre une molécule PAC et une chaîne de Novolac

La viscosité suit alors la loi de Buesche Grassly :

$$\mu = B \cdot M^a$$

Avec B une constante et M la masse moléculaire

La valeur de "a" passe de 1 à 3 ou 4 en présence du composé PAC. La viscosité augmente considérablement et la température de fluage devient alors proche de la température de solidification. Pour optimiser le fluage, il faut donc détruire le composé PAC par une exposition. Ce qui justifie les résultats de la figure 2-14.

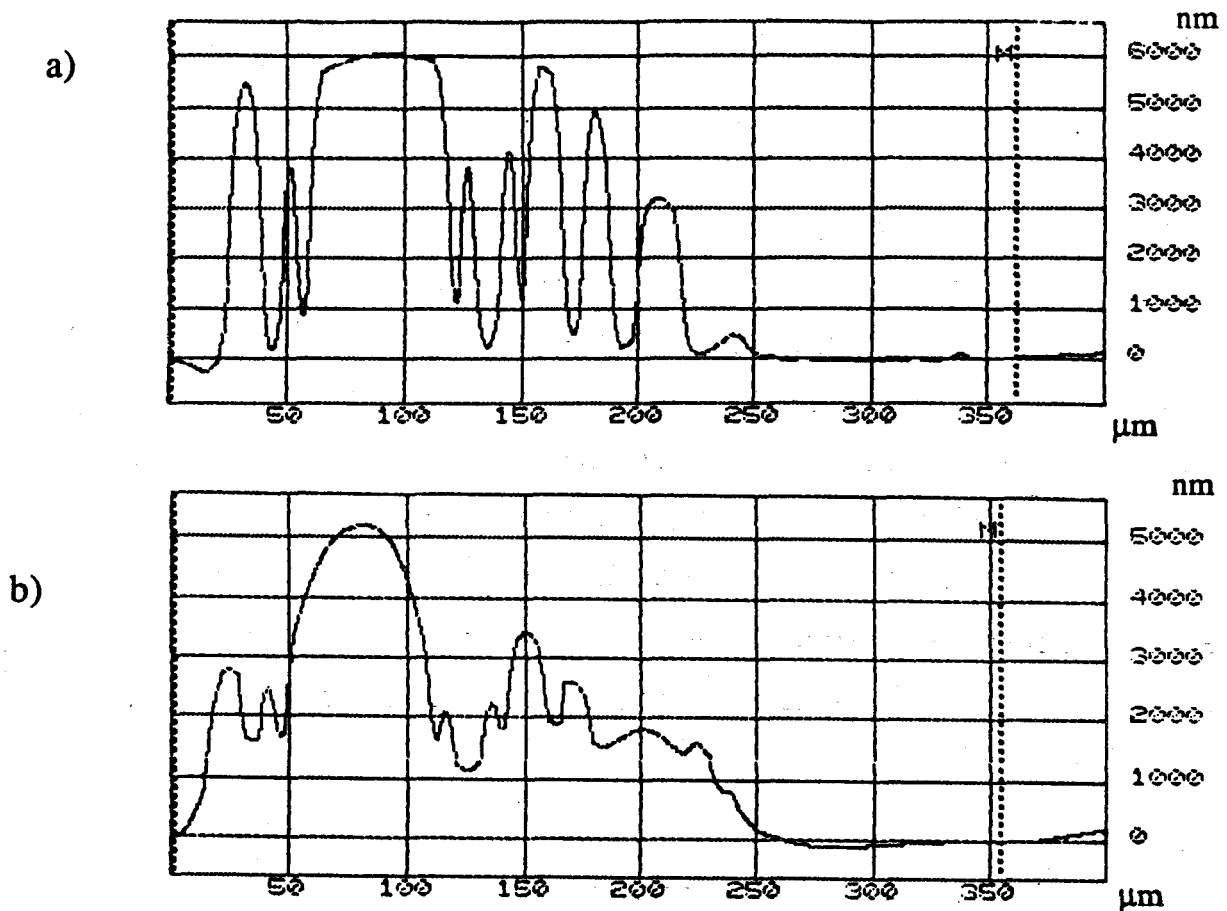


Figure 2-14 : Profils de la résine sur des motifs de 850nm de hauteur de marche
a) Sans exposition b) avec exposition

2.4.6 Le traitement thermique

Pour augmenter sa résistance à la température dans le cadre d'une gravure plasma, la photorésine HPR204 doit subir un recuit à une température minimum de 180°C appelé "hardbake". Dans les paragraphes suivants, nous étudierons l'effet d'un traitement thermique sur le fluage, puis nous fixerons la température et le type de recuit.

a) Effet d'un traitement thermique

Sur deux plaques, nous réalisons le pelliculage et le premier recuit à 100°C. L'une d'entre elles est ensuite recuite à 200°C pendant 30 minutes dans une étuve. Les courbes de la figure 2-15, obtenues au profilomètre, montrent que le recuit adoucit les pentes et donc améliore le fluage. L'amplitude de la dénivellation est légèrement diminuée par l'effet du recuit. Le motif a une largeur de 50µm de large. Comme nous le verrons, ce choix est motivé par le fait que 50µm correspond à une largeur critique à partir de laquelle la planarisation est difficile.

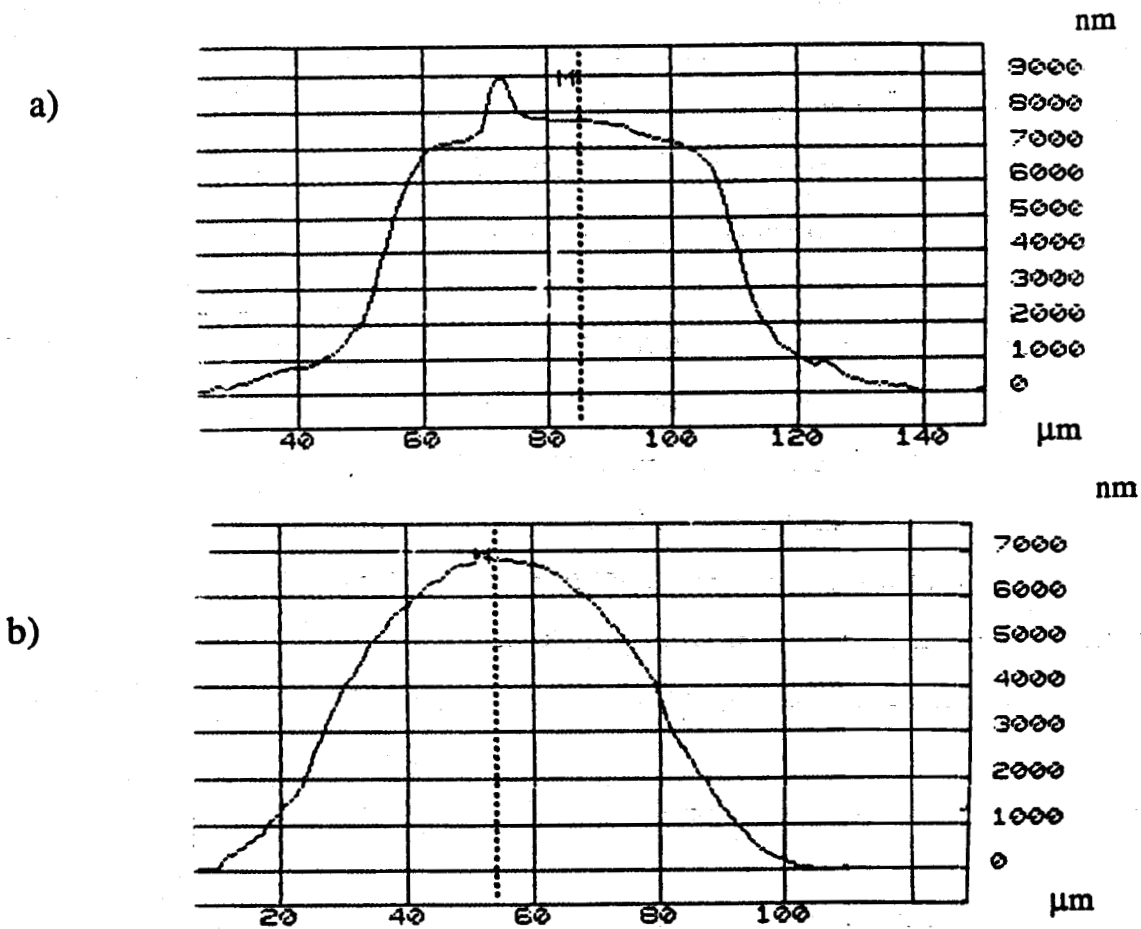


Figure 2-15 : Profils de résine obtenus sur des plots d'aluminium de 50µm sans recuit (a) et avec recuit (b)

Comme l'a montré Eyring, la viscosité suit la loi d'Arrhénius :

$$\mu = C.e^{E/kT}$$

Avec C constante, E énergie d'activation, T température, et k constante de Boltzman.

Plus la température est élevée et plus le matériau flue. Mais à partir d'une certaine température la résine se polymérise, elle limite puis stoppe le fluage. L'optimum consiste à conserver la viscosité de faible valeur le plus longtemps possible, comme nous l'avons vu dans la Partie 2-3. T.R. Pampalone [17] propose un programme de recuit en deux temps. La première période est consacrée au fluage de la résine avec une température telle que la viscosité soit la plus faible possible. La deuxième période vise à polymériser la résine rapidement avec une température alors beaucoup plus élevée. Mais ne disposant pas d'équipement de chauffage adéquat, nous ne ferons qu'un seul recuit à une température donnée.

b) Détermination de la température et du type de recuit

A. Schiltz [16] a montré que pour la résine HPR204, la température de solidification ou formation de "cross-linking" est de l'ordre de 200°C. Il est donc inutile de dépasser cette valeur.

Sur des circuits comportant des bandes isolées ($L_w=9,4\mu\text{m}$) et des réseaux de bandes ($L_w=9,2\mu\text{m}$; $L_s=2,5\mu\text{m}$), nous avons réalisé les opérations de pelliculage, de "softbake" et d'exposition. Deux équipements de recuit sont alors à notre disposition :

- l'étuve ventilée à 200°C pendant 30 minutes
- la plaque chauffante à 200°C pendant 50 secondes

Avec les deux types d'équipement, les taux de planarisation Tc (définition Partie 2-1), mesurés au profilomètre, sont identiques. Ils varient entre 90% et 100%. Le recuit sur plaque chauffante nous permettrait de réduire le temps de procédé, mais ce recuit trop rapide provoque un dégazage intempestif pouvant générer des défauts (bulles ou trous) dans la couche de polymère. Par conséquent, le traitement thermique à 200°C se fera de préférence dans une étuve ventilée.

2.4.7 Définitions des conditions de fluage

En conclusion, pour le procédé de planarisation, nous avons choisi d'utiliser la photorésine HPR204 qui a de bonnes propriétés de fluage. Les essais réalisés nous ont permis d'optimiser les conditions de fluages de cette résine et de définir le procédé de fluage comportant les opérations suivantes :

- Pelliculage de la résine HPR204 à 4100tr/min
- Recuit sur un plateau chauffé à 100°C pendant 50 secondes ("Softbake")
- Exposition aux U.V. avec une énergie de 100mJ/cm²
- Recuit dans une étuve ventilée à 200°C pendant 30 minutes ("Hardbake")

Remarque : Après le dernier recuit, l'épaisseur nominale de résine n'est plus de 1300nm mais de 1100nm.

2.5 Caractérisation de la couche de résine

Une étude quantitative de l'influence de la topologie sur les épaisseurs de résine est réalisée sous la forme d'un plan d'expérience. Un masque "PLANAR" (voir annexe 2-1), est spécialement dessiné à cet effet. Il comporte des lignes isolées de largeurs variables, et des réseaux de lignes de largeurs et d'espacements variables. La gravure de la couche métallique étant réalisée de façon sèche, la sous-gravure est considérée suffisamment faible pour assimiler la dimension des bandes d'aluminium sur masque à la dimension réelle sur plaque.

2.5.1 Influence des largeurs de bandes

Une caractérisation complète des épaisseurs de résine est effectuée sur des conducteurs dont la largeur varie de $2\mu\text{m}$ à $50\mu\text{m}$ et pour deux procédés de fluage : le procédé standard avec ou sans l'opération d'exposition. Nous rappelons que pour des conducteurs isolés, les épaisseurs de résine mesurées E_{res1} déterminent également le taux de planarisation (E_{res1}/H_m), soit la qualité du fluage.

A partir des courbes présentées à la figure 2-16, nous pouvons faire les remarques suivantes :

- a) Nous confirmons que l'exposition améliore la qualité du fluage. Mais son action est surtout ressentie pour de faibles largeurs de bandes. Ainsi pour des motifs de largeur supérieure à $50\mu\text{m}$, l'influence de l'exposition est inexistante. Ce qui nous amène à croire que quelque soit le matériau ou le procédé de fluage employé, la planarisation de motifs de plus de $50\mu\text{m}$ restera très difficile.
- b) Avec le procédé de fluage standard, les épaisseurs de résine varient de 800nm . Nous notons :
 - Une épaisseur maximale de 1100nm (épaisseur nominale de la résine) sur des plots de plus de $50\mu\text{m}$ de large.
 - Une épaisseur minimale de 300nm sur des conducteurs isolés de $2\mu\text{m}$ de large.

En annexe 2-2, nous montrons des profils de résine obtenus sur des conducteurs isolés avec le procédé de fluage standard. Pour des conducteurs de largeurs $30\mu\text{m}$ et $2\mu\text{m}$, les taux de planarisation ($E_{\text{res1}}/H\text{m}$) sont respectivement de 6% et 85%. Pour un motif de largeur supérieure à $50\mu\text{m}$, le taux de planarisation par la résine est donc presque nul. Néanmoins la dénivellation est très lente. Après un etch-back idéal, la couche de diélectrique présentera, au lieu d'une marche initiale d'angle à 90° , une pente douce de quelques dizaines de degrés. La mesure de l'angle de la pente formée par la résine est une autre façon d'apprécier la qualité d'un fluage.

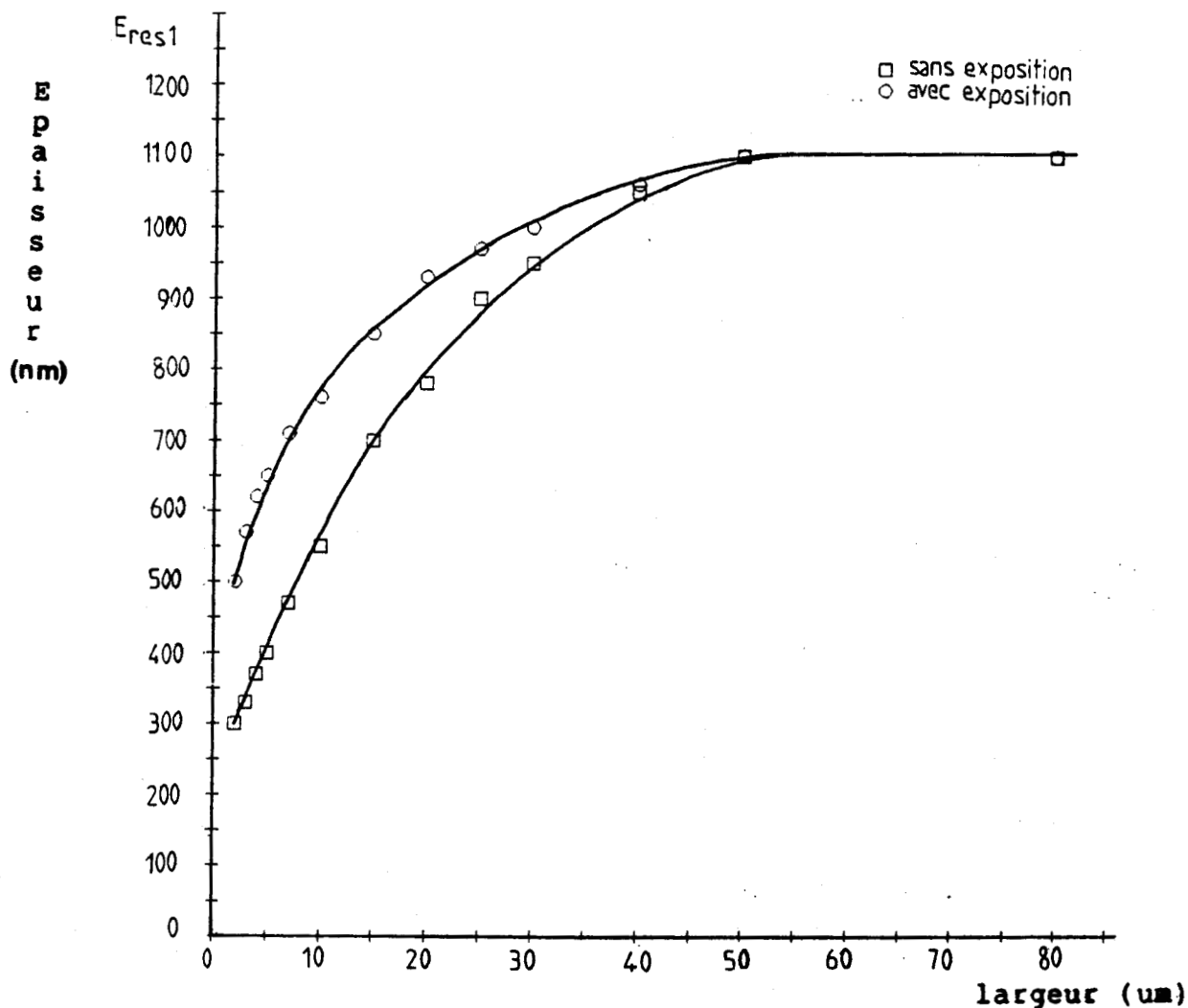


Figure 2-16 : Variation des épaisseurs de résine $E_{\text{res1}}(i)$ en fonction des largeurs de conducteurs

2.5.2 Influence de la densité des réseaux : Plan d'expérience

L'influence des caractéristiques du réseau sur les épaisseurs de résine est étudié par un plan d'expérience. Les facteurs que nous faisons varier sont :

- la largeur de bande L_w ,
- l'espace entre bandes L_s
- et le nombre de bandes

Toutes les données et les résultats du plan sont présentées à la figure 2-17. Dans le Tableau 1, les valeurs réduites -1 et +1 de chacun des facteurs sont fixées suivant leur plage de variation. Ensuite le plan expérimental est défini par le Tableau 2. Tous les réseaux ainsi déterminés sont dessinés sur le masque "PLANAR". Au centre de chacun d'entre eux, nous mesurons l'épaisseur de résine qui constitue le vecteur réponse. Enfin, l'exploitation du plan d'expérience nous permet de quantifier les effets de chacun des facteurs dont les valeurs sont rassemblées dans le Tableau 3.

Nous observons les points suivants :

- 1) Le nombre de bandes variant de 6 à 18 n'influe pas sur l'épaisseur du polymère.
- 2) les effets de la largeur de bandes et de leur espacement sont importants et identiques en valeur absolue.

A partir des résultats du plan d'expérience, nous pouvons modéliser le vecteur réponse et tracer des courbes d'isovaleurs. Dans une première approximation, nous écrivons l'équation suivante :

$$E_{res1} = 112 \cdot X_1 - 112 \cdot X_2$$

$$\text{ou } E_{res1} = 56 \cdot (L_w - 4) - 45 \cdot (L_s - 5.5)$$

Le vecteur réponse peut, plus précisément, être représenté par une équation du second degré :

$$Y = C_0 + C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_3 X_3 + C_{11} X_1^2 + C_{12} X_1 X_2 \dots$$

Les variables :

- X1 : Largeur de bande (Lw)
- X2 : Largeur des espaces (Ls)
- X3 : Nombre de bandes (N)

La réponse :

- Y : Epaisseur de résine

Tableau 1 : Définition des valeurs réduites

	X1	X2	X3
- 1	2um	8um	18um
+ 1	6um	3um	6um

Tableau 2 : Matrice factorielle 2

N°	X1	X2	X3	Y
1	-1	-1	-1	700
2	+1	-1	-1	970
3	-1	+1	-1	500
4	+1	+1	-1	700
5	-1	-1	+1	750
6	+1	-1	+1	950
7	-1	+1	+1	525
8	+1	+1	+1	750

Tableau 3 : Matrice des effets

E_i : Effet de X_i

Unité : nm

E_{ij} : Effet de X_iX_j

Précision : +/- 50nm

E1	E2	E3	E12	E23	E13	E123
+112	-112	+13	-5	+5	-5	+12

Figure 2-17 : Plan d'expérience concernant les épaisseurs de résine en fonction des réseaux

Par une régression linéaire utilisant la méthode des moindres carrés, on détermine les coefficients $C_0, C_1, C_2, \dots, C_{33}$. A partir de l'équation ainsi obtenue, nous représentons sur le graphique de la figure 18, les courbes d'isovaleurs d'épaisseur de résine Eres1. Celle-ci croît linéairement en fonction de la densité des réseaux (Ls et Lw).

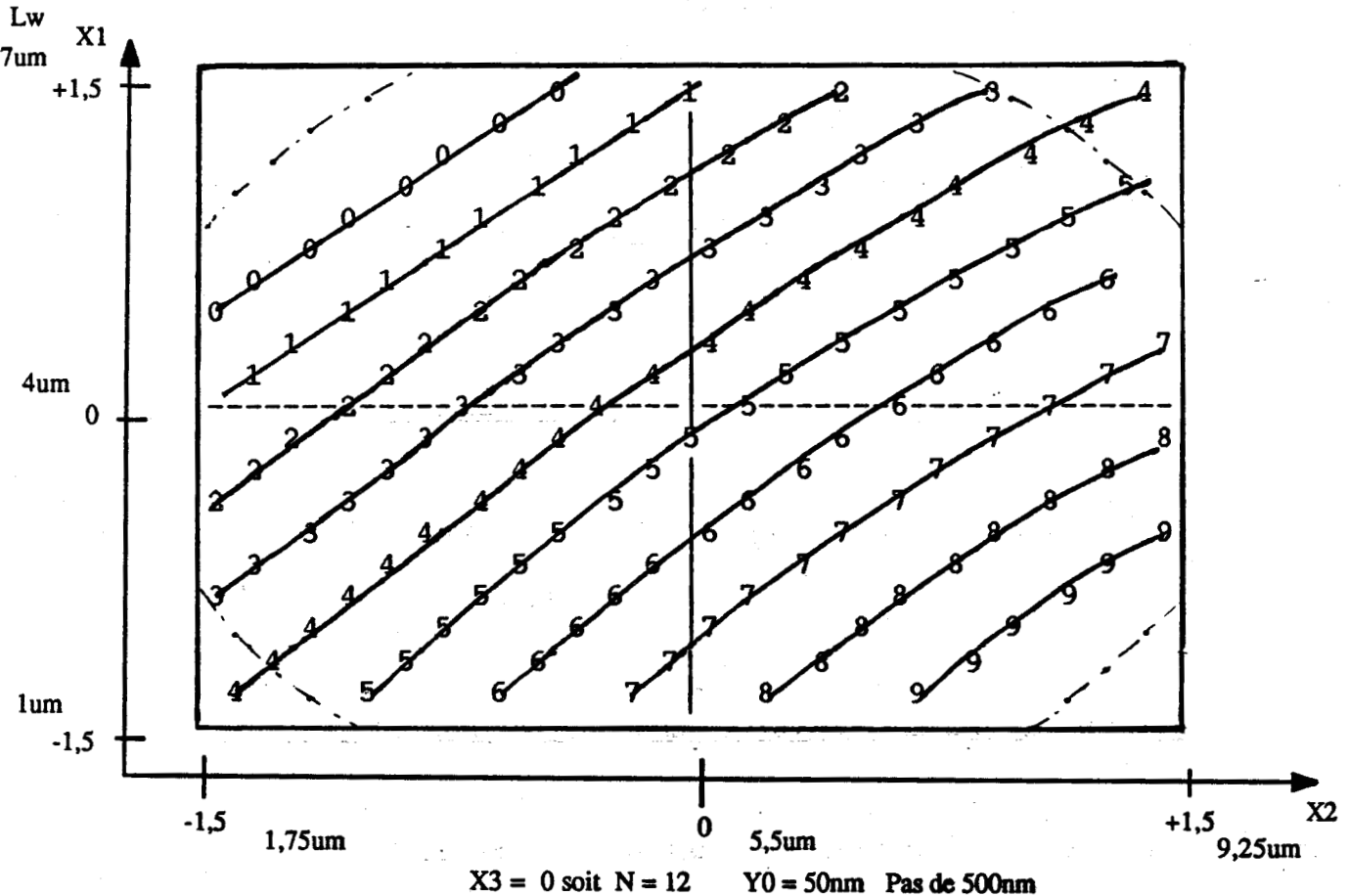


Figure 2.18 : Courbes d'iso-épaisseurs pour des réseaux de bandes de largeur et d'espace variables

En annexe 2-3, sont présentés les profils de résine sur quelques réseaux. Qualitativement, nous remarquons les points suivants :

- L'épaisseur de résine est de façon générale plus faible au bord des réseaux qu'au centre.
- La planarisation de la surface est de meilleure qualité pour les réseaux denses, confirmant les résultats de simulation.

En résumé, de part la qualité du fluage quasi-idéale, l'épaisseur de résine Eres2, comme l'épaisseur de résine Eres1, augmentent linéairement avec la densité des circuits.

2.5.3 Conclusion

1) Conséquence de la Qualité du fluage

Le taux de planarisation de la résine sur un motif de plus de $50\mu\text{m}$ de large est de 0%. Cependant après un etch-back idéal, le diélectrique ne présentera plus aucune marche à 90° . Par contre, le taux de planarisation de réseaux tend vers 100%, mais la quantité de résine entre les conducteurs est importante. Le risque est de ne pas graver idéalement toute la résine au cours de l'etch-back et de créer des marches à 90° dans la couche de diélectrique. En conclusion, ce sont dans les réseaux denses que la couche de diélectrique planarisée présentera les marches les plus importantes.

2) Conséquence des variations d'épaisseurs de résine

Après l'étape de fluage, nous constatons une épaisseur de résine minimale sur les motifs isolés les plus étroits, et maximale sur les motifs de plus de $50\mu\text{m}$ de large. Pour des conducteurs de 850nm d'épaisseur, la couche de résine présente des variations d'épaisseurs (ΔE_{res1}) de 800nm qui seront transférées dans la couche de diélectrique au cours de l'etch-back. En supposant cette étape idéale et en se référant à l'équation 2.9, il faut déposer initialement une épaisseur de diélectrique minimale de 1650nm ($H_m + \Delta E_{\text{res1}}$) pour optimiser la qualité de la planarisation.

CHAPITRE 3

ETAPE D'ETCH-BACK

3.1 Introduction

L'étape de fluage de la résine ayant été optimisée, notre objectif est maintenant d'effectuer l'etch-back, c'est-à-dire de transférer la planéité du profil de la résine au niveau de la couche de diélectrique. Ce transfert peut être réalisé grâce à la gravure par plasma de la résine et de l'oxyde à la même vitesse. Nous développerons donc, au cours de ce chapitre, un procédé de gravure répondant à cette exigence.

Le procédé devra vérifier les points suivants :

- Hauteurs de marches finales de 300nm maximum
- Minimisation du temps de gravure
- Reproductibilité absolue des résultats (dans le temps et pour tous types de circuits)

Dans la première partie, nous présenterons la chimie des plasmas utilisée pour graver des couches d'oxyde et de résine.

Dans la deuxième partie, nous mettrons au point un procédé de gravure dans un équipement de gravure sèche de type R.G.V. (Réacteur à Grande Vitesse), sur des plaques de tests. Nous quantifierons ensuite, autour de ce point de fonctionnement, l'influence des paramètres de gravure tels que la puissance RF et les flux des gaz, sur les vitesses et uniformités de gravure, et sur le rapport des vitesses (vitesse de gravure oxyde/vitesse de gravure résine).

Les procédés de fluage et de gravure étant déterminés, nous expérimenterons, dans une troisième partie, l'étape de planarisation sur des plaques comportant un premier niveau de métallisation. Nous définirons alors des paramètres de contrôle qui nous permettront d'apprécier la qualité de la planarisation. Et, nous optimiserons l'étape de planarisation.

3.2 Présentation Générale de la gravure par plasma

3.2.1 le plasma

3.2.1.1 Ou'est-ce qu'un plasma ?

Un plasma est un gaz ionisé satisfaisant à la condition d'électroneutralité macroscopique : la concentration ionique égale la concentration électronique.

On soumet habituellement le gaz situé dans une enceinte sous pression réduite, à un champ électrique appliqué à deux électrodes par un générateur R.F. La décharge crée des ions, des électrons et des espèces neutres plus ou moins excitées (radicaux libres). Dès que les densités de charges atteignent une valeur seuil, il s'établit un régime d'équilibre stationnaire caractérisé par une zone centrale quasi-neutre où le champ résultant est faible. Près des parois et des électrodes, une zone sans plasma s'établit, assimilée visuellement à un espace sombre où le champ est intense. La figure 3-1 présente, pour un réacteur diode (planar), les différentes zones du plasma [1]. Pour compenser les pertes de charges par recombinaison en volume et en surface, il faut apporter en permanence une énergie. C'est le rôle de l'alimentation RF.

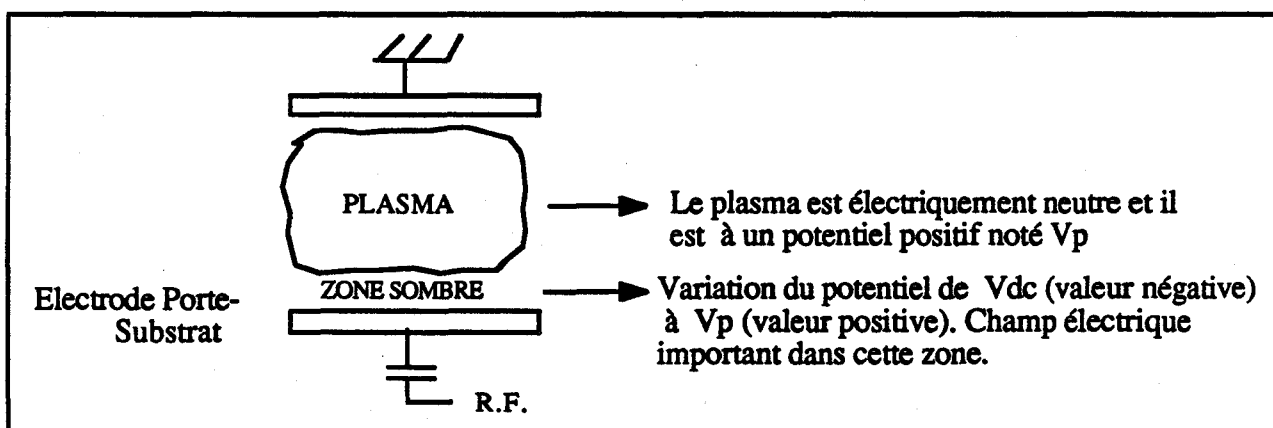


Figure 3-1 : Présentation des différentes zones du plasma dans un réacteur diode (planar)

3.2.1.2 Conditions nécessaires pour l'obtention d'une gravure sèche

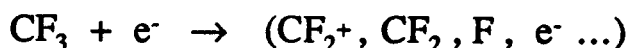
Le concept de base est très simple. On crée une décharge dans un gaz moléculaire relativement inerte. L'impact des électrons dissocie et ionise les molécules, produisant des espèces chimiquement réactives. Le gaz de gravure est choisi de sorte que les espèces produites réagissent chimiquement avec le matériau solide à graver et forme un produit volatil. Le produit de la réaction désorbe dans la phase gazeuse et est évacué par pompage. Le composé volatil formé doit être suffisamment stable dans le plasma pour qu'il ne se décompose pas en formant des dépôts solides avant son évacuation {2,3}.

3.2.2 La gravure de l'oxyde

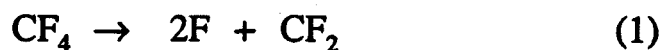
Pour graver l'oxyde, on utilise des gaz fluorés CF_4 , SF_6 , NF_3 . Le produit de la réaction, SiF_4 , est volatil.

3.2.2.1 Présentation des réactions de gravure dans un plasma de CF_4

Dans un plasma de tétrafluorure de carbone, les réactions principales de dissociation sont :



Les espèces actives ainsi créées réagissent avec la surface d'oxyde. En se limitant aux éléments fluorés et difluorocarbonés, la gravure de l'oxyde est schématisée par les équations suivantes :



3.2.2.2 Détermination des principaux agents de gravure de l'oxyde

En ajoutant de l'oxygène à un plasma de CF_4 , nous augmentons la concentration atomique de fluor. En effet, nous avons :



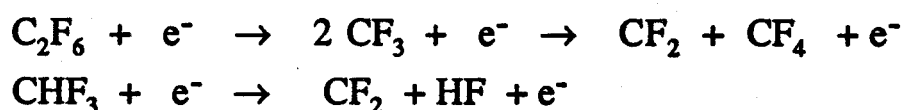
Par contre en ajoutant de l'hydrogène à un plasma de CF_4 , nous diminuons la concentration atomique de fluor, car nous avons :



De nombreux articles traitent de la chimie des plasmas de CF_4 utilisés pour les gravures du silicium et de l'oxyde, avec pour but de définir un procédé ayant une sélectivité de gravure importante {4,5,6,7}. Ils montrent que la vitesse de gravure du silicium varie considérablement en fonction des flux d'hydrogène et d'oxygène, alors que la gravure de l'oxyde reste relativement constante. Par conséquent, nous pouvons dire que :

- 1) L'atome de fluor est le principal agent de la gravure du silicium, mais il ne l'est pas pour la gravure de l'oxyde.
- 2) Les principaux responsables de la gravure de l'oxyde sont en fait les radicaux CF_x ou ions CF_x^+ (réaction 3 prédominante).

Avec les autres gaz à base de fréon, C_2F_6 et CHF_3 , les principaux fragments neutres produits par les réactions de dissociation sont indiqués ci-dessous :



Ces deux gaz génèrent des radicaux de CF_2 qui contribuent à la gravure de l'oxyde. Le C_2F_6 libérant plus de radicaux de CF_2 que le CHF_3 , il est plus réactif.

3.2.2.3 La polymérisation

Plusieurs études sont réalisées pour déterminer le mécanisme de dépôt de polymère, pendant la gravure de silicium et d'oxyde, dans un plasma de fluorocarbure {4-8}. La contribution de radicaux CF_x , et principalement CF_2 , est suggérée. La réaction fait intervenir le phénomène de polymérisation de gaz monomères insaturés (déficient en fluor) :



Un plasma de CHF_3 réagit de la même façon qu'un plasma de $(CF_4 + H_2)$. Or l'addition d'hydrogène augmente la déficience du plasma en atome de fluor. Par conséquent, en utilisant comme gaz le CHF_3 , nous augmentons le risque de polymérisation.

3.2.3 La gravure de la résine

Pour graver les matériaux organiques, on utilise généralement de l'oxygène pur ou accompagné de gaz fluorés {9}. Les réactions liées à la présence d'atomes d'oxygène sont décrites ci-dessous, et elles sont schématisées à la figure 3-2 :

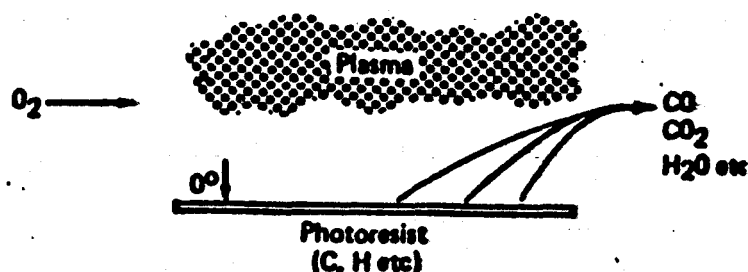
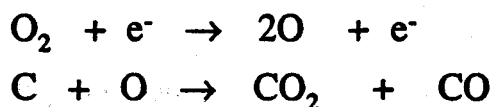


Figure 3-2 : Schématisation de la gravure de la résine par un plasma d' O_2

3.2.4 Conclusions

A travers cet exposé sur la chimie des plasmas, nous avons rappelé les points suivants :

- 1) Les radicaux CF_x , par exemple CF_2 , générés dans un plasma de CF_4 , sont les principaux agents de gravure de l'oxyde.
- 2) Ces mêmes radicaux, et principalement CF_2 , sont également à l'origine de la polymérisation.
- 3) Un plasma de C_2F_6 a les mêmes caractéristiques qu'un plasma de CF_4 , mais avec un meilleur rendement.
- 4) Un plasma de CHF_3 grave également l'oxyde mais avec un risque de polymérisation plus important.
- 5) La gravure de l'oxyde est peu influencée par l'augmentation de flux d'oxygène.
- 6) La résine est principalement gravée par l'oxygène.

Pour le procédé d'etch-back, nous désirons obtenir des vitesses de gravure oxyde et résine égales. La gravure de la résine est principalement influencée par le flux d'oxygène, et celle de l'oxyde par l'augmentation des radicaux CF_x . Par conséquent, avec l'utilisation des gaz (C_2F_6 , CHF_3 , O_2), nous devrions pouvoir trouver un point de fonctionnement.

3.3 Détermination du procédé de gravure

Dans un réacteur planar décrit ci-après, nous mettrons au point un procédé permettant de graver la résine et l'oxyde à la même vitesse. Ensuite, nous quantifierons l'influence des différents paramètres chimiques (Puissance, Flux des gaz) par un plan d'expérience, dans une fenêtre de travail située autour du point de fonctionnement.

3.3.1 Présentation du réacteur

Pour développer le procédé de gravure appelé etch-back, nous disposons d'un équipement de gravure plaque à plaque fabriqué par Alcatel, sous la référence "GIR. 262" dont la description se trouve en annexe 3-1.

Il comporte deux réacteurs et un SAS de chargement, protégeant les surfaces internes des réacteurs contre l'adsorption de vapeur d'eau et d'atomes d'oxygène. Les chambres sont de type R.G.V. (Réacteur à grande vitesse) et la pression utilisée est élevée (100Pa à 200Pa). Les réacteurs comportent des électrodes en carbone, injectrices des gaz, très proches et de surface identiques aux électrodes porte-substrat. La distance inter-électrodes (D.I.E.) peut varier de 3 à 10mm. Par conséquent, le plasma est confiné, riche en espèces actives, et la gravure est rapide. Sur l'électrode "porte-substrat", on applique une tension alternative de fréquence de 13,56Mhz pour activer le plasma.

Actuellement cet équipement est utilisé en production, principalement pour la réalisation des contacts entre les deux premiers niveaux de métallisation. Notre but est de définir, dans cet équipement, le procédé d'etch-back.

3.3.2 Préparation des essais

3.3.2.1 Préparation des échantillons

Pour mettre au point le procédé de gravure, il est intéressant de pouvoir calculer les vitesses de gravure de l'oxyde et de la résine, sur une même plaque de silicium. Par conséquent, nous réalisons une étape de photolithographie sur une couche d'oxyde préalablement déposée. Le résultat est présenté à la figure 3-3b. En prenant, pour l'étape de photolithographie, un masque inverse d'un masque de métallisation, nous simulons une partie de l'étape d'etch-back correspondant au moment où nous commençons à graver la résine et l'oxyde en même temps. Comme nous le présente la figure 3-3, les surfaces de résine et d'oxyde, sur les plaques de tests et sur les plaques subissant l'etch-back, sont quasi-équivalentes. En effet la sous-gravure de l'aluminium, dans le cas d'une gravure humide, est compensée par l'épaisseur d'oxyde déposée sur les flancs des conducteurs d'aluminium.

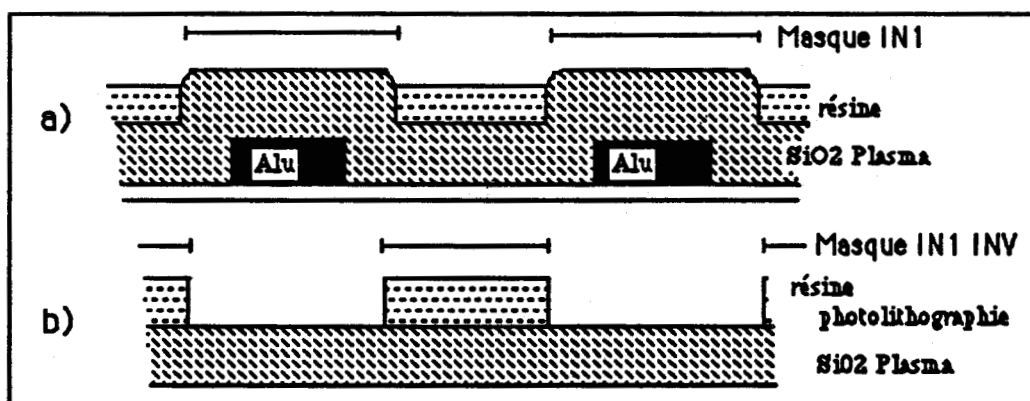


Figure 3-3 : Schémas de coupe a) plaques subissant l'etch-back b) plaques de tests

Les plaques de test sont donc préparées de la façon suivante :

- 1- Dépôt d'une couche de 1000nm d'oxyde PECVD.
- 2- Etape de photolithographie avec un masque inverse du masque de métallisation* (Pelliculage - Exposition - Développement)
- 3- Recuit dans une étuve 30 minutes à 200°C.

* Sans autre indication, c'est le masque ACE2200 IN1 INV qui est utilisé.

3.3.2.2 Définitions des mesures

Pour calculer les vitesses et les uniformités de gravure, nous mesurons les épaisseurs des couches avant et après gravure avec un instrument basé sur l'interférométrie optique. Ayant déterminé, par rapport à notre réacteur, les endroits où la vitesse atteint systématiquement une valeur extrême, nous pouvons connaître l'uniformité de gravure avec un minimum de mesures. Les trois points de mesure choisis sont représentés à la figure 3-4.

Les expressions nous permettant de calculer les vitesses, les uniformités de gravure et la sélectivité sont ainsi définies :

Soit : - "xx" à remplacer par "ox" pour l'oxyde et par "res" pour la résine

- Exxi l'épaisseur initiale (avant gravure)
- Exxf l'épaisseur finale (après gravure)
- T le temps de gravure
- Vxx la vitesse de gravure et Uxx l'uniformité de gravure
- Sox/res ou R, sélectivité ou ratio des vitesses de gravure

Nous avons :

$$V_{xx} = (E_{xxf} - E_{xxi}) / T$$

$$U_{xx} = (V_{xxmax} - V_{xxmin}) / (V_{xxmax} + V_{xxmin})$$

$$Sox/res \text{ ou } R, \text{ sélectivité ou ratio } Sox/res = R = V_{ox} / V_{res}$$

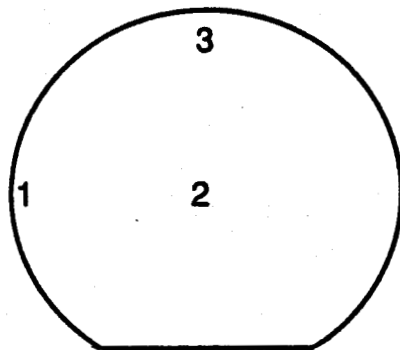


Figure 3-4 : Lieux de mesure des épaisseurs sur les plaques de tests

3.3.3 Détermination d'un point de fonctionnement

Notre objectif est de définir, dans notre équipement et avec les gaz C_2F_6 , CHF_3 , He et O_2 , un procédé de gravure qui vérifie les conditions suivantes :

- 1) Gravures de l'oxyde et de la résine à la même vitesse, soit un ratio des vitesses de gravure de 1.
- 2) Vitesses de gravure supérieures à 300nm/min, pour limiter la durée du procédé.

3.3.3.1 Description des essais

Quelques paramètres tels que le flux d'Hélium, la pression et la distance inter électrode (D.I.E.) sont fixés respectivement à 40sccm, 133Pa et 6mm. Quant aux autres paramètres, Puissance, Flux des gaz (C_2F_6 , CHF_3 et O_2), nous les ferons varier un à un, à partir d'un procédé de base défini ci-dessous. Nous déterminerons ainsi leur influence sur les vitesses et uniformités de gravure.

Procédé de base :	Puissance	350 W	Flux de C_2F_6	10sccm
	Pression	133 Pa	Flux de CHF_3	20sccm
	Flux de He	40sccm	Flux de O_2	5sccm
	D.I.E. (Distance Inter Electrode) 6mm			

3.3.3.2 Résultats des essais

Pour chaque manipulation, deux plaques de tests ont été gravées et mesurées en trois points. Nous présentons aux figures 3-5, 3-6, 3-7 et 3-8, les courbes obtenues correspondant aux variations de la puissance R.F. et des flux de C_2F_6 , de CHF_3 et d' O_2 . Les conclusions sont les suivantes :

a) Influence de la Puissance R.F.

La courbe de la figure 3-5 montre une corrélation linéaire entre la puissance et les vitesses de gravure de l'oxyde et de la résine. La puissance accroît la densité et l'énergie des ions. Par conséquent, elle augmente les vitesses de gravure de façon plus importante pour l'oxyde que pour la résine. Cette différence peut être utilisée pour ajuster le ratio des vitesses de gravure à 1. L'influence de la puissance sur l'uniformité de gravure n'étant pas significative, nous ne l'avons pas représentée.

b) Influence du flux de C_2F_6

L'augmentation du flux de C_2F_6 jusqu'à 10sccm, a pour effet d'accroître la vitesse de gravure de l'oxyde, comme le présente la figure 3-6. Mais pour des flux dépassant 10sccm, le phénomène de polymérisation devient important, et provoque la diminution de la vitesse de gravure de l'oxyde, puis la détérioration de l'uniformité de gravure de la résine à partir de 15sccm.

c) Influence du flux de CHF_3

Comme pour le flux de C_2F_6 , la figure 3-7 montre qu'à partir d'un flux de CHF_3 de 20sccm, le phénomène de polymérisation entraîne une décroissance de la vitesse de l'oxyde et une détérioration de l'uniformité de gravure de la résine.

Il est donc conseillé pour les flux de C_2F_6 , de CHF_3 , de ne pas dépasser respectivement 15sccm et 30sccm.

d) Influence du flux d' O_2

En augmentant le flux d'oxygène, nous augmentons considérablement la vitesse de gravure de la résine (figure 3-8). Cette évolution est en accord avec la partie théorique développée à la partie 3.2.3. Le flux d'oxygène nous permettra donc d'obtenir rapidement un ratio des vitesses de gravure égal à 1. Il faut également remarquer que l'uniformité de gravure de la résine se détériore avec l'augmentation du flux d'oxygène.

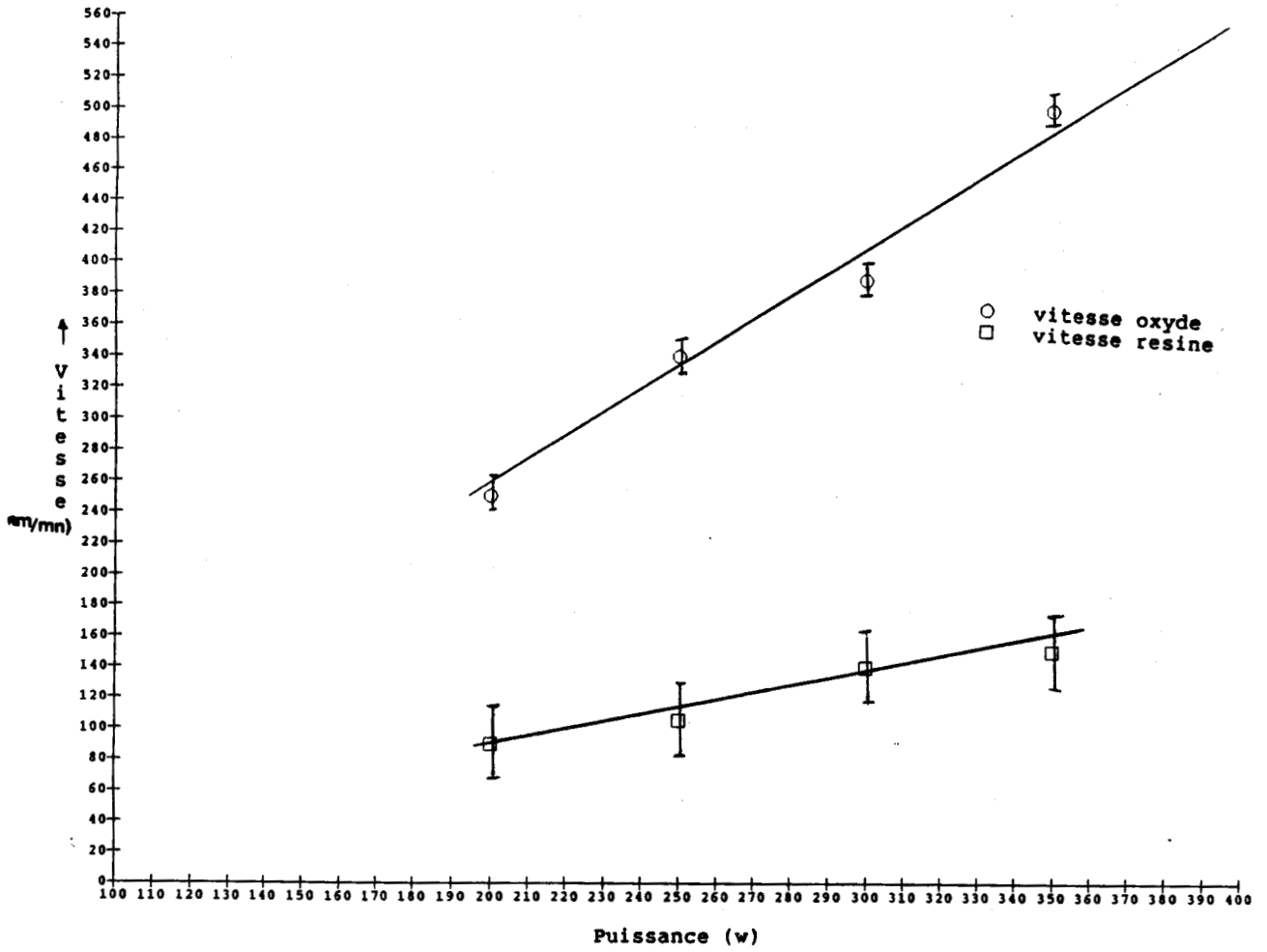


Figure 3-5 : Influence de la puissance sur les vitesses de gravure

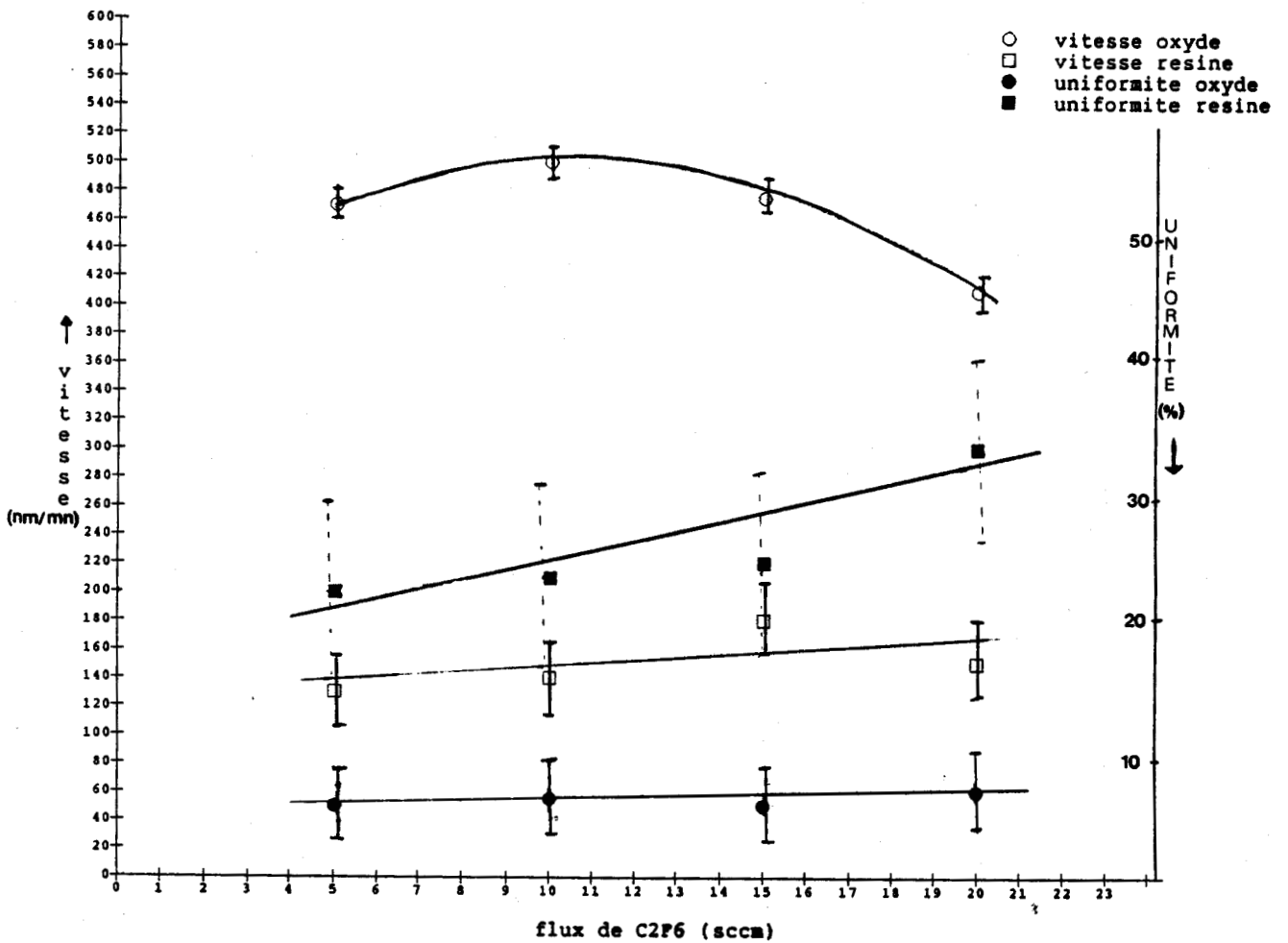


Figure 3-6 : Influence du flux de C₂F₆ sur les vitesses et uniformites de gravure

- 60 -

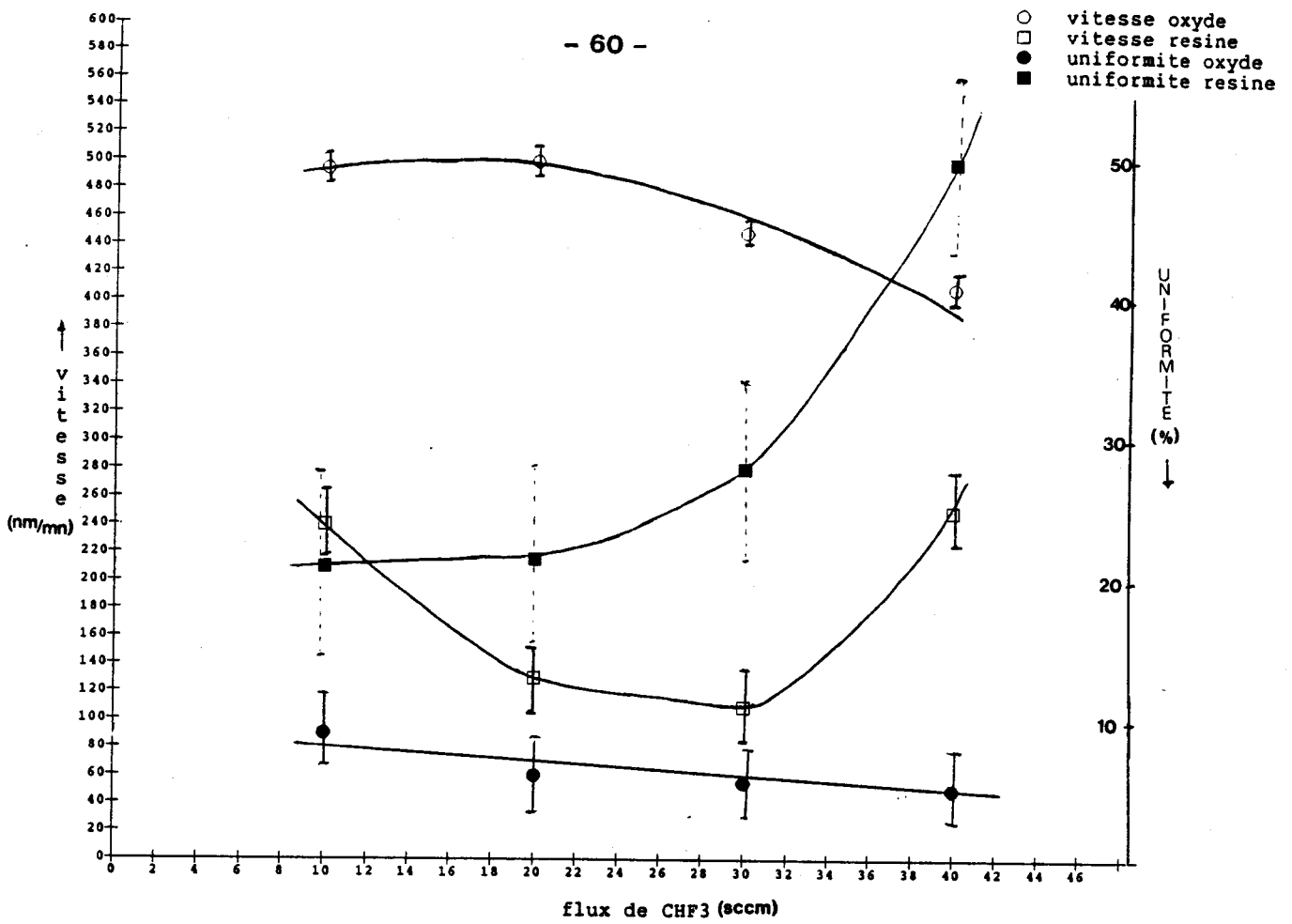


Figure 3-7 : Influence du flux de CHF₃ sur les vitesses et uniformites de gravure

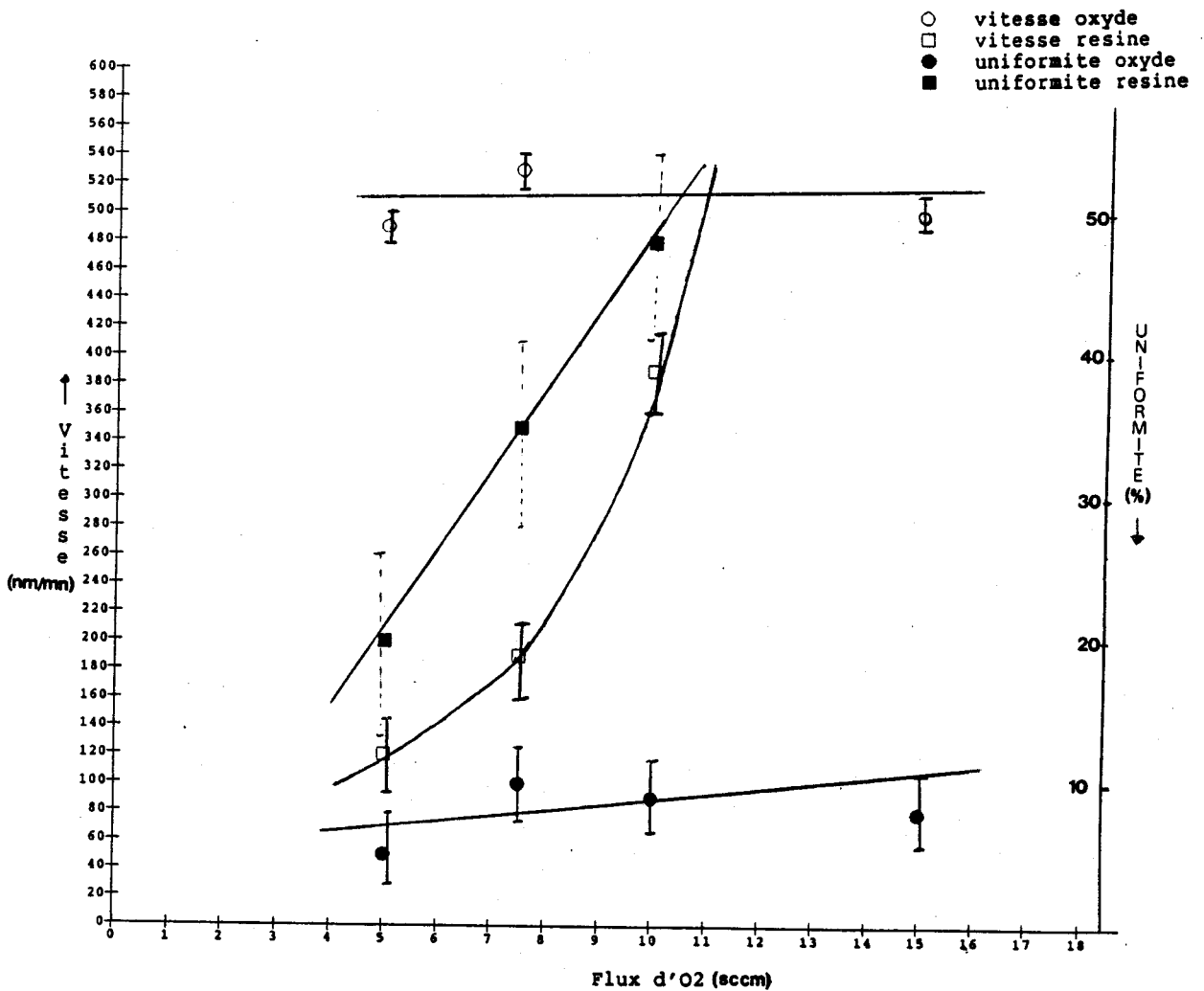


Figure 3-8 : Influence du flux d'O₂ sur les vitesses et uniformites de gravure

Grâce à l'ensemble des courbes obtenues, nous avons déterminé le point de fonctionnement suivant :

Conditions de gravure :	Puissance	350 W	Flux de C2F6	15sccm
	Pression	133 Pa	Flux de CHF3	21sccm
	Flux de He	40sccm	Flux de O2	15sccm
	D.I.E. (Distance Inter Electrode) 6mm			

Les résultats sont :

Voxyde : 360nm/mn	Uoxyde : 7%
Vrésine : 380nm/mn	Urésine : 9% R = 0.94

Les uniformités sont opposées pour l'oxyde et la résine. La gravure de l'oxyde tend à créer une surface convexe, tandis que celle de la résine engendre une surface concave. Par conséquent le ratio moyen des vitesses de gravure vaut 0.94, mais il varie entre 0.80 au centre et 1.15 au bord de la plaque.

3.3.4 Réalisation du plan d'expérience

Le plan d'expérience permet une modélisation quantitative complète et rapide des vitesses de gravure, des uniformités de gravure et des ratio des vitesses de gravure dans une fenêtre de travail située autour du point de fonctionnement défini précédemment. La fenêtre de travail est définie par les variations de la Puissance R.F. de 100W et des gaz CHF_3 , O_2 et C_2F_6 d'environ 10sccm. Dans le cas d'un plan d'expérience appliqué à la gravure plasma, il est conseillé de limiter la variation des paramètres pour les raisons suivantes :

- 1) Pour chacune des expériences, il faut qu'il y ait formation d'un plasma.
- 2) Les influences des paramètres sont alors supposés linéaires et nous pouvons utiliser un plan du premier ordre.

3.3.4.1 Description des expériences

Tous les éléments relatifs à l'élaboration et l'exploitation de ce plan sont représentés aux figures 3-9 et 3-10. Les facteurs pris en compte dans cette étude sont la puissance R.F. et les flux des gaz C_2F_6 , CHF_3 et O_2 . En associant le facteur "flux de C_2F_6 " à l'interaction des trois autres facteurs supposée faible, nous réduisons le plan de 2^4 à 2^3 expériences. Le tableau 1 montre les valeurs extrêmes prises par ces facteurs, et à partir desquelles sont définies les variables réduites -1 et +1. Les vecteurs réponses sont les vitesses de gravure de l'oxyde et de la résine, ainsi que leur uniformité et le ratio des vitesses. L'ensemble des expériences est ensuite établi par la matrice factorielle du tableau 2 qui comporte également tous les résultats. Enfin, l'exploitation du plan d'expérience permet de quantifier, pour chacun des vecteurs réponses, les effets des différents facteurs dont les valeurs sont rassemblées dans le tableau 3.

3.3.4.2 Résultats du plan d'expérience

Dans la fenêtre de travail étudiée, nous observons les points suivants :

- a) la puissance R.F. est le facteur prédominant dans la détermination de la vitesse de gravure de l'oxyde (Y1), suivi du flux de C_2F_6 .
- b) la vitesse de gravure de la résine (Y2) est principalement liée au flux d'oxygène, comme nous l'avons déjà vu, mais elle dépend également de la puissance R.F. et du flux de CHF_3 .
- c) le ratio (Y3) dépend principalement des flux de CHF_3 et d' O_2 (ϕO_2).

Compte-tenu de la précision de mesure des uniformités de gravure de l'oxyde et de la résine (Y4 et Y5), il est impossible de faire des conclusions.

Pour les vitesses de gravure et leur ratio, nous pouvons écrire, en première approximation, le modèle suivant :

$$V_{ox} = V_{oxmoy} + 50 (X1) + 12 (X4)$$

$$\text{soit } V_{ox} = 365 + (W - 350) + 2.4 (\phi C_2F_6 - 20)$$

$$V_{res} = 31 (X1) - 43 (X2) + 83 (X3)$$

$$\text{soit } V_{res} = 0.62 (W - 350) - 6.6 (\phi CHF_3 - 23.5) + 16.6 (\phi O_2 - 15)$$

$$R = 0.15 (X2) - 0.28 (X3)$$

$$\text{soit } R = 0.02 (\phi CHF_3 - 23.5) - 0.06 (\phi O_2 - 15)$$

Avec toutes les données du plan d'expérience, nous traçons les graphes d'isovaleurs. La figure 3-10 présente les valeurs du ratio en fonction de la puissance R.F. et du flux de CHF_3 et l'annexe 3-2, les valeurs des vitesses de gravure en fonction de la puissance R.F. et des flux de CHF_3 et d' O_2 .

Les variables

- X1 : Puissance (W)
- X2 : Flux de CHF3 (sccm)
- X3 : Flux d'O2 (sccm)
- X4 : Flux de C2F6 (sccm)

Les réponses

- Y1 : Vitesse d'oxyde (nm/min)
- Y2 : Vitesse de résine (nm/min)
- Y3 : Ratio (Oxyde/Résine)
- Y4 : Uniformité oxyde (%)
- Y5 : Uniformité de résine (%)

Tableau 1 : Définitions des variables réduites

	X1	X2	X3	X4
- 1	400W	17sccm	10sccm	15sccm
+ 1	300W	30sccm	20sccm	25sccm

Tableau 2 : Matrice factorielle 2

N°	X1	X2	X3	X4	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5
1	-1	-1	-1	-1	330	290	1.15	4.5	8.6
2	+1	-1	-1	+1	405	315	1.3	4.9	13
3	-1	+1	-1	+1	290	200	1.5	6.3	8.5
4	+1	+1	-1	-1	415	220	1.85	9.0	17
5	-1	-1	+1	+1	300	380	0.8	8.9	4.4
6	+1	-1	+1	-1	425	550	0.75	8.1	4.5
7	-1	+1	+1	-1	340	360	0.95	11	8.1
8	+1	+1	+1	-1	420	400	1.05	7.8	8.0

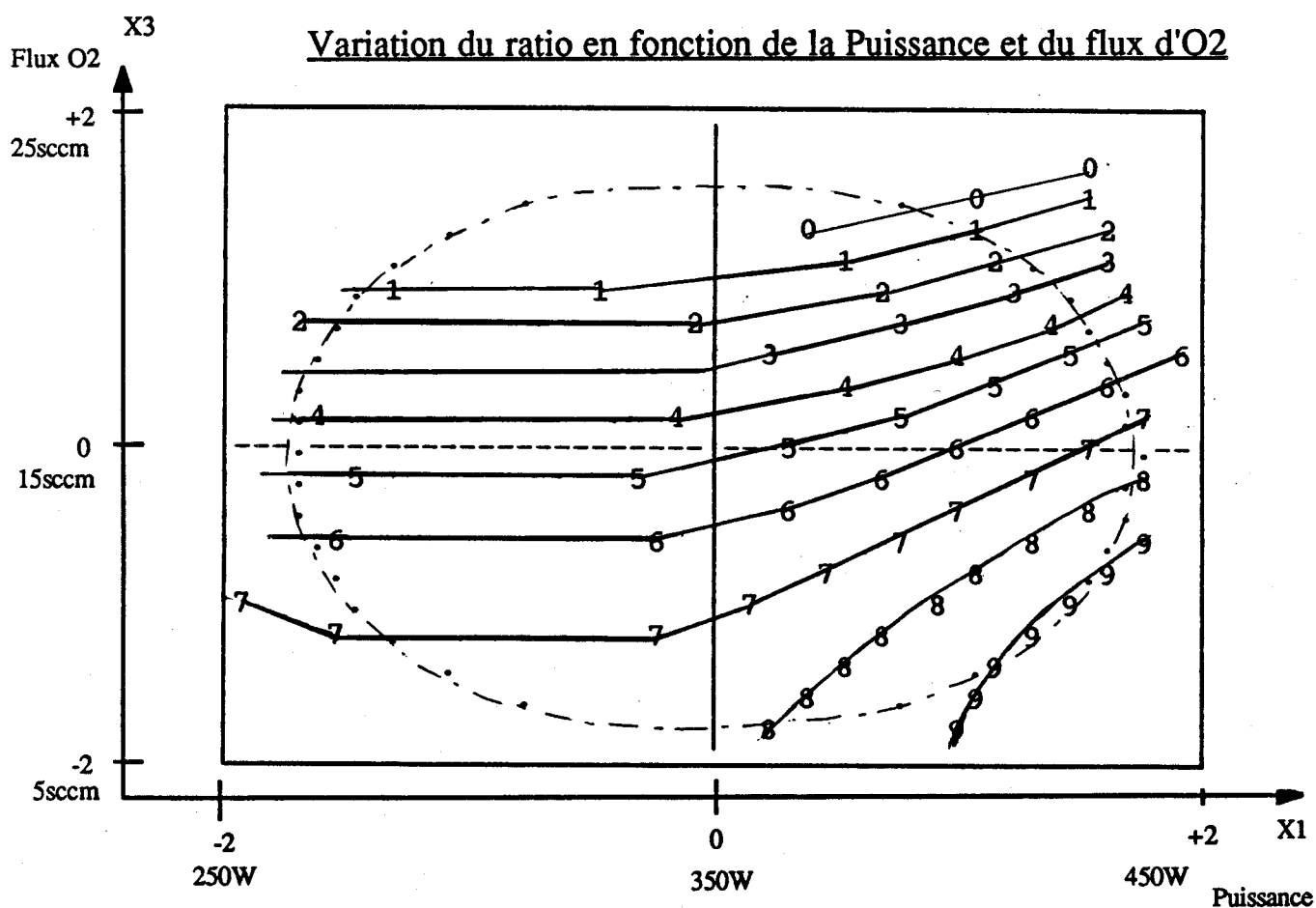
Figure 3-9 : Présentation du plan d'expérience

Tableau 3 : Matrice des effets

Pécisions		E1	E2	E3	E12	E23	E13	E123
10nm/min	Y1	50	0	5	0	8	0	12
25nm/min	Y2	31	-43	83	-16	0	20	16
0.11	Y3	0.0	0.15	-0.28	0.0	-0.05	-0.05	0.0
2.7%	Y4	-0.1	0.96	1.4	-0.1	-0.5	-0.8	-0.6
7%	Y5	1.6	1.4	-2.7	0.5	0.4	-1.6	-0.5

E_i : Effet de X_i ; E_{ij} : Effet de X_iX_j

Courbes d'isovaleurs



X₂ = 0 soit Flux de CHF₃ (23,5sccm)

Ratio : Y₃ = 0.7 Pas de 0.1

Figure 3-10 : Résultats du plan d'expérience

En ce qui concerne ces graphes d'isovaleurs (ou abaqués), il faut savoir que dans le temps, nous pouvons observer un décalage de toutes les courbes lié, par exemple, à une usure d'électrode. En effet, l'électrode supérieure en graphite, durant le procédé d'etch-back, s'use avec une vitesse de gravure de 40nm/min. La D.I.E. (Distance Inter-électrode) alors augmente, entraînant des diminutions de vitesses de gravure. Par conséquent, les valeurs du ratio et des vitesses de gravure des abaqués sont données à titre indicatif. Par contre, les écarts entre chacune des courbes, comme la quantification des effets de chacun des paramètres, peuvent être utilisés sans aucune restriction.

En conclusion, ce plan d'expérience nous donne une meilleure connaissance du procédé dans toute une fenêtre de travail. Ayant quantifié les effets des principaux paramètres, il nous sera, à présent, facile d'ajuster le procédé d'etch-back, le cas échéant.

3.4 Réalisation de l'etch-back

3.4.1 Choix du procédé d'etch-back

Dans l'étape de planarisation, l'etch-back intervient après le procédé de fluage. Il consiste à transférer la planéité de la résine au niveau du diélectrique à planariser. Au cours de cette étape, nous attaquons d'abord la couche de 400nm de résine qui recouvre toute la surface, puis la résine et l'oxyde à la même vitesse.

Le procédé d'etch-back peut comporter deux pas de gravure. Avant le pas de gravure permettant d'attaquer la résine et l'oxyde à la même vitesse, un autre pas peut être ajouté dans le but de graver la résine plus vite et avec une meilleure uniformité. Mais ce pas supplémentaire ne durerait pas plus de 30secondes et sa durée est critique. Tout dépassement de temps détériorerait rapidement la qualité finale de la planarisation. Pour assurer un procédé très reproductible dans le temps, nous avons donc préféré choisir un procédé d'etch-back en un seul pas. Le procédé de gravure alors utilisé, est défini dans la partie précédente.

Dans les paragraphes suivants, nous étudierons l'effet de charge, qui est caractérisé par une diminution ou augmentation de la vitesse de gravure, dans des conditions de gravure données, pour une quantité croissante de matériau à graver {10}. Cet effet de charge, qui apparaît au cours de l'etch-back, a des conséquences sur la qualité et la reproductibilité de la planarisation. Par conséquent, nous serons amené à réajuster le procédé de gravure. Et, après avoir défini des paramètres de contrôle de l'étape de planarisation, nous testerons la reproductibilité du procédé en fonction de la densité des circuits.

3.4.2 Etude de l'effet de charge

3.4.2.1 Caractérisation de l'effet de charge

Dans notre cas, l'effet de charge apparaît lorsque nous commençons à découvrir des surfaces d'oxyde. La gravure de l'oxyde génère des atomes d'oxygène qui augmentent la vitesse de gravure de la résine. Pour mettre en évidence ce phénomène, nous mesurerons les vitesses de gravure de résine et d'oxyde sur des plaques de tests dont la surface d'oxyde varie.

Sur une couche d'oxyde déposée, nous réalisons l'étape de photolithographie avec des masques dont le taux d'ouverture varie de 3.5% à 82.5% . Pour un même procédé de gravure décrit ci-dessous, la courbe de la figure 3-11 montre une croissance linéaire de la vitesse de gravure de la résine, en fonction de la surface d'oxyde à graver. On dit que la résine subit un effet de charge. Par contre la vitesse de gravure de l'oxyde reste constante.

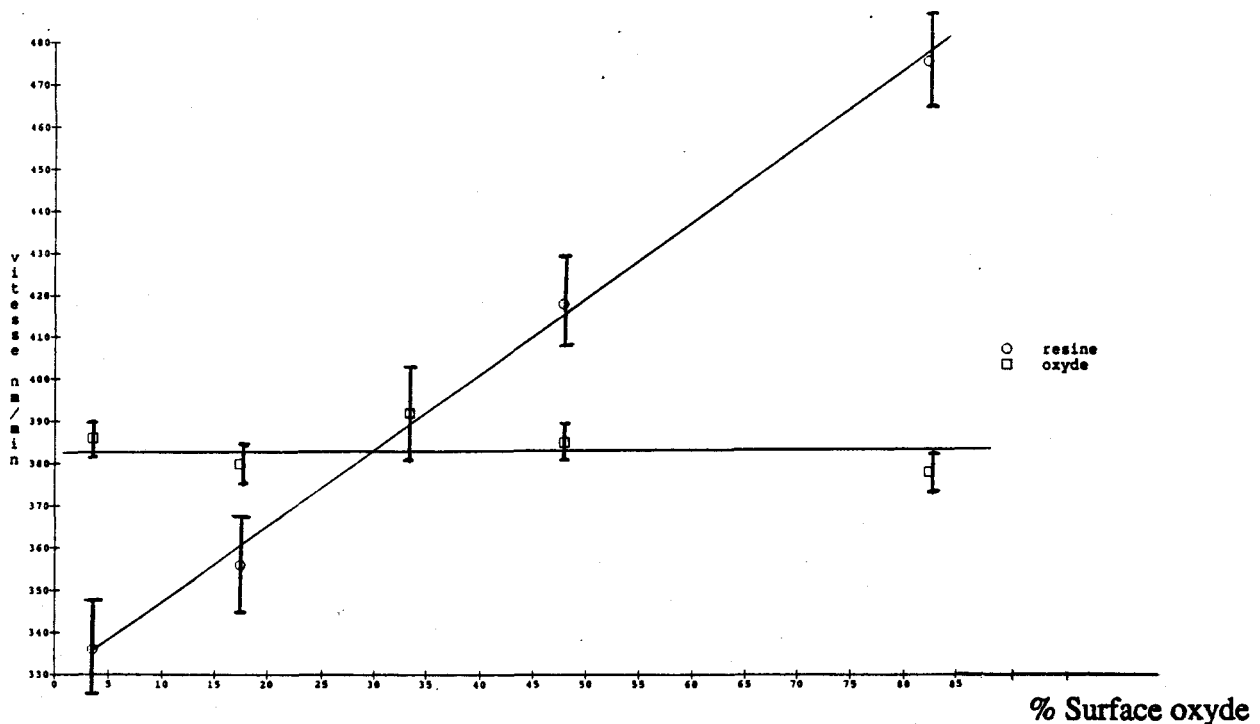


Figure 3-11 : Influence du pourcentage de surface en oxyde sur les vitesses de gravure oxyde et résine

Conditions de gravure : D.I.E. (Distance Inter Electrode) 6mm

Puissance	350 W	Flux de C2F6	15sccm
Pression	133 Pa	Flux de CHF3	21sccm
Flux de He	40sccm	Flux de O2	15sccm

3.4.2.2 Conséquences de l'effet de charge

a) Conséquence sur la qualité de la planarisation

Nous avons vu dans le Chapitre 2 que les épaisseurs de résine variaient suivant la topologie. Par conséquent, après avoir gravé une épaisseur de 400nm de résine, nous découvrons l'oxyde sur les motifs dans l'ordre suivant :

- 1^{ère} : les conducteurs étroits et isolés
- 2^{ème} : les réseaux de bandes métalliques
- 3^{ème} : les plots de contacts
- 4^{ème} : les espaces entre les conducteurs

Au cours du procédé d'etch-back, la surface d'oxyde à graver augmente. La vitesse de gravure de la résine ne cesse de croître à cause de l'effet de charge, et comme la vitesse de gravure de l'oxyde reste constante, le ratio ne cesse de diminuer. Ainsi en fin de procédé, la quantité de résine qui reste à graver dans les réseaux denses se fait attaquer beaucoup plus vite que l'oxyde, faisant apparaître des marches (Figure 3-12).

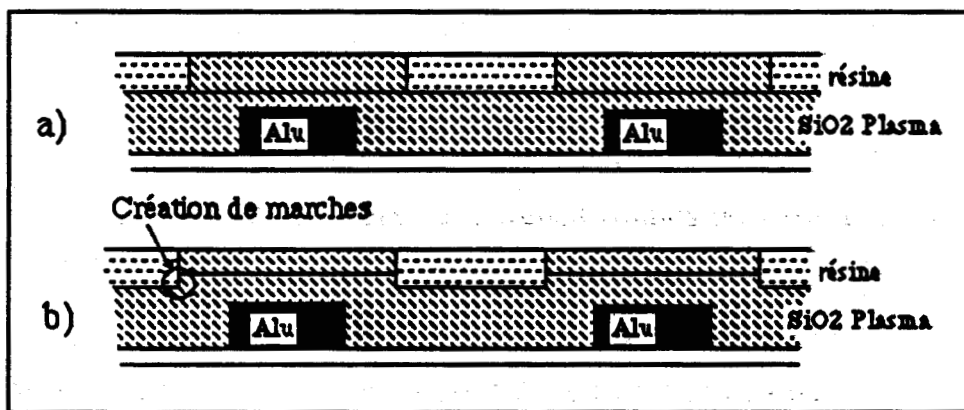


Figure 3-12 : Influence de l'effet de charge sur la planéité finale

- a) Sans effet de charge - cas idéal -
- b) Avec effet de charge - cas réel -

b) Conséquence sur la densité des circuits

En supposant une épaisseur de résine constante sur tous les motifs, la surface d'oxyde découvert au cours de l'etch-back est alors fonction de la densité des circuits. Par conséquent, il semble que plus un circuit est dense, plus la vitesse de gravure de la résine est élevée et plus le ratio est faible. Dans cette hypothèse, les hauteurs de marches finales sont d'autant plus importantes que le circuit est dense. Cependant tous les circuits comportent des motifs de toutes tailles. Les surfaces d'oxyde se découvrent progressivement quelle que soit la densité du circuit. L'effet de charge sera alors le même pour tous les circuits et les résultats de planarisation seront indépendants de la densité des circuits.

Nous verrons expérimentalement dans la partie 3.4.4 l'impact réel de l'effet de charge sur la densité des circuits.

3.4.2.3 Amélioration du procédé

Au cours de l'etch-back, nous observons une diminution constante du ratio. Pour compenser l'effet de charge, il suffit d'ajuster le ratio du procédé de gravure à une valeur supérieure à 1, pour garantir un ratio moyen de 1 durant l'etch-back.

En pratique, ce ratio est ajusté en augmentant le flux d'oxygène conformément aux résultats du plan d'expérience. Le procédé final devient :

Conditions de gravure :	Puissance	350 W	Flux de C2F6	15sccm
	Pression	133 Pa	Flux de CHF3	21sccm
	Flux de He	40sccm	Flux de O2	11,5sccm
	D.I.E. (Distance Inter Electrode) 6mm			

Résultats :	Voxyde : 360nm/mn	Uoxyde : 8.5%	
	Vrésine : 330nm/mn	Urésine : 11%	R = 1,1

3.4.3 Détermination des paramètres de contrôle

Pour déterminer la qualité de la planarisation, nous définissons les trois paramètres suivants :

- la hauteur de marche
- l'épaisseur de diélectrique maximale restant après etch-back
- la variation d'épaisseur de diélectrique entre motifs de tailles différentes

3.4.3.1 La marche finale

La hauteur de marche caractérise parfaitement la qualité de l'étape de planarisation. Tout incident intervenant pendant le fluage de la résine (température de recuit insuffisant, pas d'exposition), ou pendant la gravure (ratio incorrect, gravure insuffisante) modifie considérablement ce paramètre. L'objectif est d'avoir après etch-back, des hauteurs de marches inférieures à 300nm.

La hauteur de marche maximale est atteinte dans les réseaux les plus denses, réseaux pour lesquelles l'épaisseur de résine à graver est maximale. Dans les PCM (Process Module Controle), situés en cinq endroits de la plaque de silicium, un réseau de pavés d'aluminium, servant habituellement à la mesure de résistance de contact, (300 contacts en série), nous permettra d'effectuer correctement une mesure au profilomètre de la hauteur de marche. Bien que les motifs d'aluminium soient espacés de 9 μ m et que le stylet du profilomètre ait un diamètre de 12,5 μ m, ce dernier grâce à son rayon de courbure, pénétrera au fond du creux pour une hauteur de marche devenant inférieure à 600nm.

La figure 3-13 montre quelques courbes obtenues au profilomètre :

- avant l'étape de planarisation du diélectrique, la mesure de hauteur de marche est impossible.
- après l'étape de planarisation du diélectrique, la mesure est fiable.
- pour une température de recuit insuffisante pendant l'étape de fluage, la forme des marches est arrondie et leur hauteur dépasse la norme fixée de 300nm.

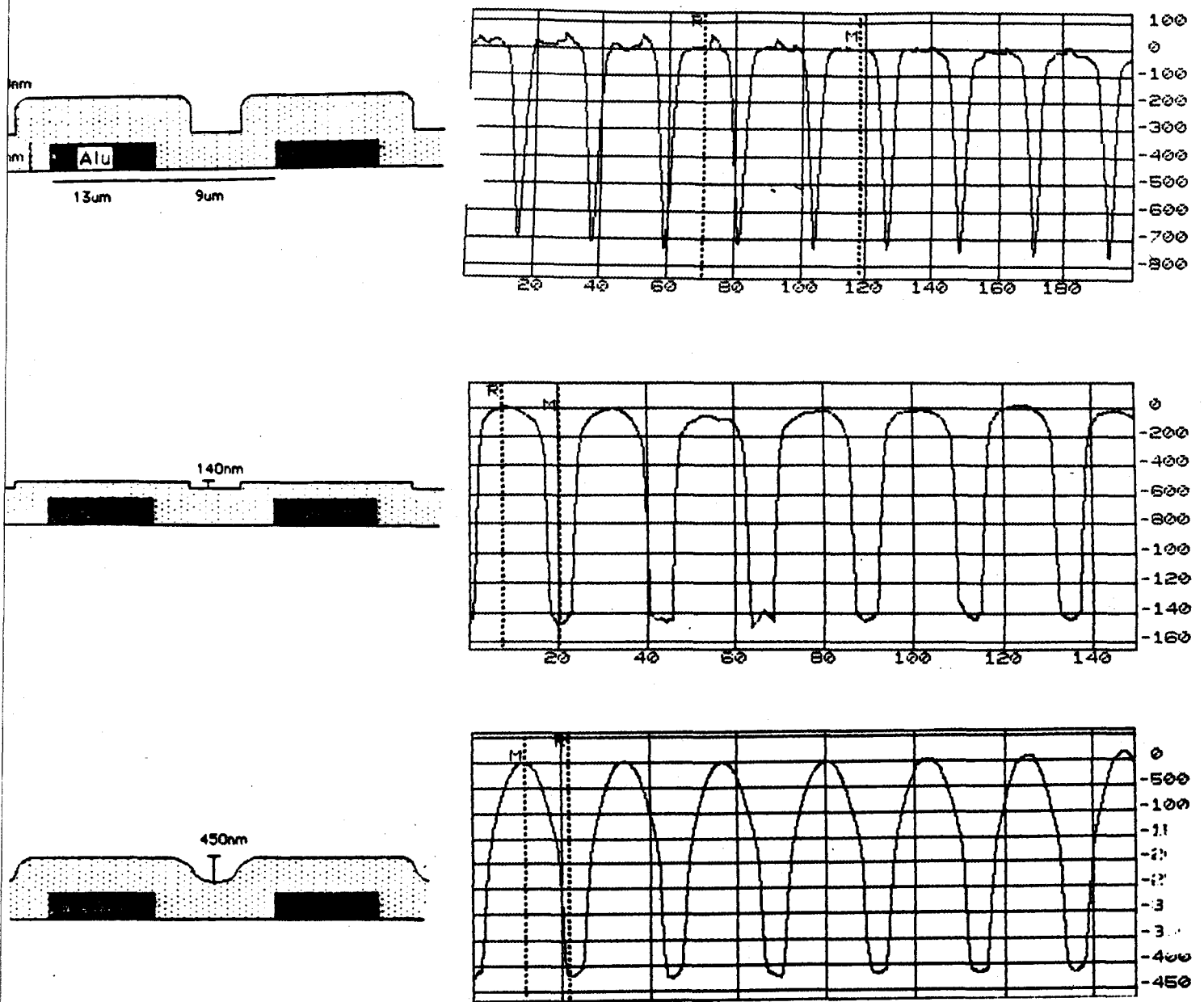


Figure 3-13 : Mesures au profilomètre de hauteurs de marche dans un motif PCM

- a) Après le dépôt de 1400nm d'oxyde PECVD
- b) Après l'étape d'etch-back
- c) Après l'étape d'etch-back mais avec un recuit de la résine à 180°C au lieu de 200°C

3.4.3.2 L'épaisseur de diélectrique après etch-back

Il est nécessaire de contrôler l'épaisseur d'oxyde restant, après l'étape de planarisation, pour la raison suivante :

Pour une épaisseur d'oxyde gravé trop importante, nous risquons de découvrir l'aluminium et de créer des marches, plus particulièrement sur les conducteurs étroits et isolés. Les schémas de la figure 3-14 rappellent les différentes épaisseurs de résine après l'étape de fluage sur trois types de motifs - zone sans motif, conducteur isolé, plot de plus de $50\mu\text{m}$ - et leur incidence sur les épaisseurs de diélectrique après etch-back.

Sur un motif de silicium large et isolé, recouvert initialement d'une épaisseur de résine de 1100nm , nous mesurerons l'épaisseur de diélectrique restant après etch-back. Cette mesure nous indiquera donc, l'épaisseur d'oxyde maximale se trouvant sur les circuits avoisinants après l'etch-back. Pour déterminer la norme inférieure de ce paramètre de contrôle, il faut fixer l'épaisseur minimale autorisée sur les conducteurs isolés de $2\mu\text{m}$ de large. Si nous permettons à la couche de diélectrique de descendre en dessous du niveau des interconnexions de 150nm , nous nous imposerons une épaisseur de diélectrique sur motifs de contrôle de 650nm (figure 3-14).

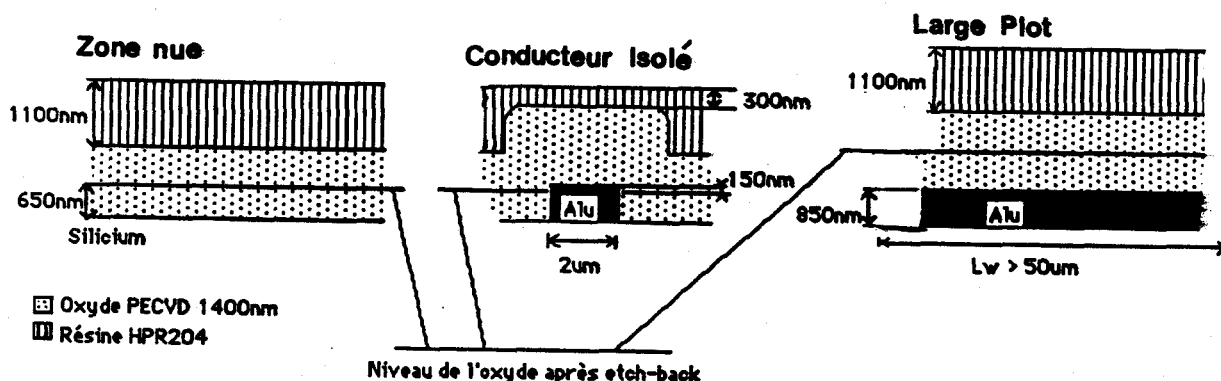


Figure 3-14 : Variation des épaisseurs de résine après fluage et d'oxyde après etch-back pour différents motifs

3.4.3.3 La variation d'épaisseurs de diélectrique

Nous avons vu, dans le chapitre 2, qu'après l'étape de fluage les épaisseurs de résine variaient en fonction de la topologie. Pour deux motifs de tailles différentes, l'écart d'épaisseurs de résine est transféré au cours de l'etch-back dans la couche d'oxyde. Cependant il subira, en plus, l'effet du ratio. Ainsi, pour une valeur du ratio supérieure à 1, l'écart d'épaisseurs d'oxyde augmentera durant l'etch-back, comme l'indique les relations suivantes :

$$R = V_{ox} / V_{res} \quad \text{et} \quad \text{si } R > 1 \quad \Delta E_{ox} / \Delta E_{res} > 1$$

Après l'étape de fluage et après l'etch-back, nous quantifierons ces écarts d'épaisseurs par des mesures au profilomètre présentés à la figure 3-15.

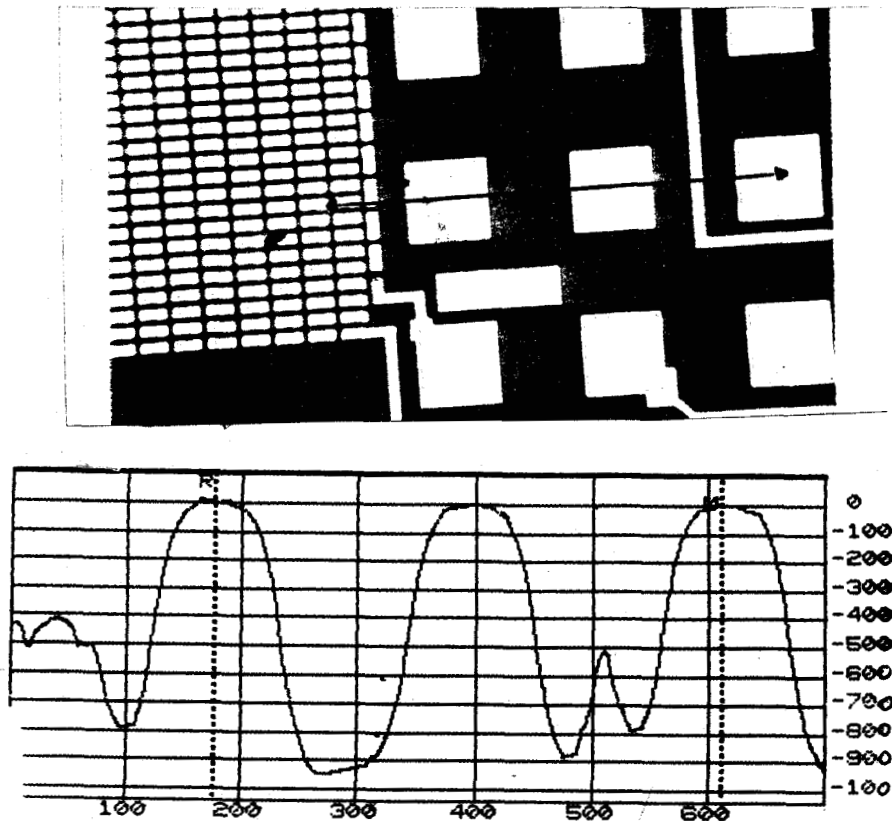


Figure 3-15 : Mesure de variation d'épaisseur d'oxyde :

- a) Lieu de la mesure
- b) Résultat au profilomètre après étape de fluage

3.4.4 Détermination de la qualité de la planarisation après etch-back

Maintenant que nous avons défini les paramètres de contrôle, nous pouvons déterminer la qualité de la planarisation du diélectrique avec les procédés de fluage et d'etch-back que nous avons développés. Nous étudierons l'effet de la densité des circuits et l'influence directe du flux d'oxygène sur la qualité de la planarisation. Pour les expériences suivantes, trois circuits de densités variables sont préparés comme indiqué dans la partie 2-4-3. Les métallisations des circuits TSA5511, SAB et R3420, gravées par voie humide, occupent respectivement 80%, 66% et 33% de la surface totale du circuit. L'etch-back est réalisé avec des flux d'oxygène variant de 9.5 à 15.5 sccm et en gravant pendant un temps fixe de 270 secondes.

3.4.4.1 La hauteur de marche

La figure 3-16 présente les variations de hauteurs de marches, au bord et au centre des trois types de plaques en fonction du flux d'oxygène. Nous avons également tracé l'évolution du ratio des vitesses de gravure mesurée pour chacun des procédés de gravure.

Nous observons :

- une décroissance linéaire du ratio en fonction du flux d'oxygène.
- une diminution des hauteurs de marches finales de 220nm pour une croissance du ratio de 0.85 point.
- une différence systématique de hauteurs de marches observées au bord et au centre. Elle s'explique par un ratio plus fort au bord de la plaque qu'au centre, d'environ 0,3 point (voir Partie 3.3.3.2).
- une diminution de la hauteur de marche d'environ 70nm pour une densité du circuit augmentant de 33% à 80% et un flux d'oxygène à 11.5sccm.

Concernant le dernier point l'explication peut être la suivante : sur un circuit dense, l'épaisseur de résine Eres1 après fluage, est en moyenne plus importante que sur un circuit de faible densité. Il faut alors attendre plus longtemps pour commencer à découvrir des surfaces d'oxyde. La décroissance du ratio liée à l'effet de charge prend du retard. Par conséquent, sur le motif que nous contrôlons, le ratio est en moyenne plus fort pour un circuit de forte densité, entraînant des hauteurs de marches de valeurs plus faibles.

3.4.4.2 L'épaisseur d'oxyde gravé

Ayant mesuré les épaisseurs de diélectrique avant et après l'étape de planarisation, nous représentons à la figure 3-17, l'influence du flux d'oxygène sur l'épaisseur de diélectrique gravé pour les trois types de circuits. Nous indiquons également les vitesses de gravure de la résine obtenues pour chacun des flux d'oxygène.

Les résultats sont :

- une augmentation linéaire des vitesses de gravure de la résine avec le flux d'oxygène.
- une augmentation de l'épaisseur d'oxyde gravé de 450nm pour une vitesse de gravure de la résine passant de 265nm/mn à 420nm/min.
- une croissance de l'épaisseur d'oxyde gravé de 100nm pour une densité de circuits passant de 33% à 80%. L'explication est la suivante : sur les circuits denses, nous découvrons au cours de l'etch-back des surfaces d'oxyde plus importantes, qui augmenteront la vitesse de gravure de la résine et donc la quantité d'oxyde gravé, pour une gravure en temps.

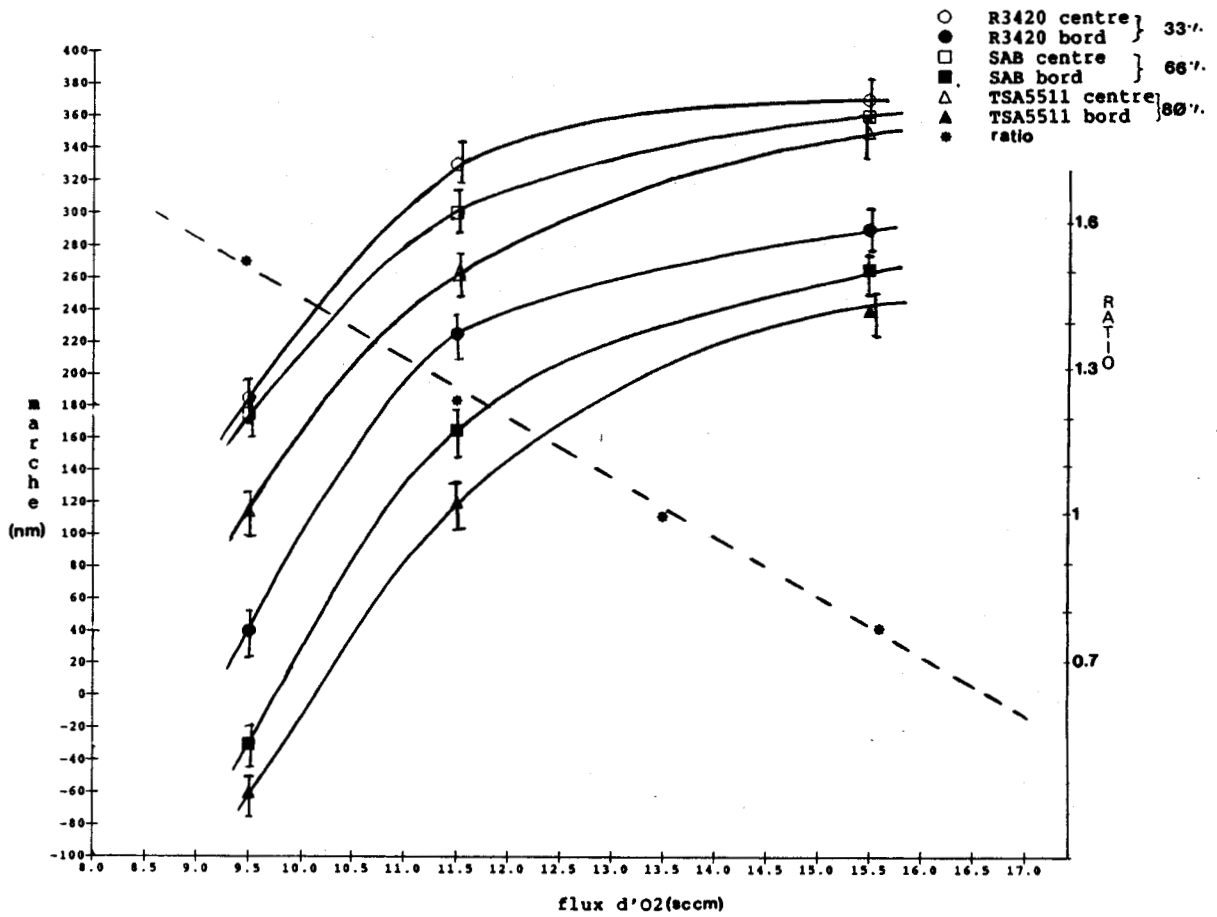


Figure 3-16 : Variation de la hauteur de marche en fonction du flux d'O₂ et pour différents types de circuit

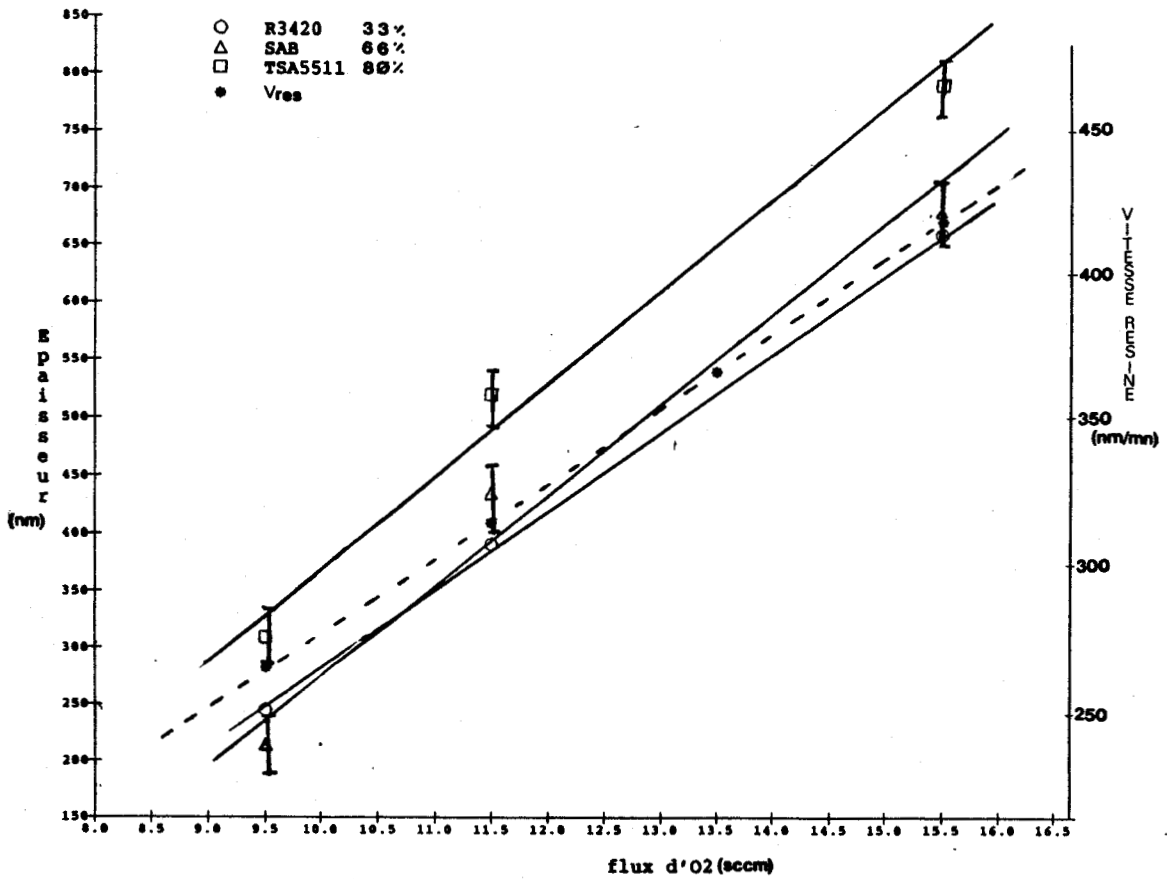


Figure 3-17 : Variation de l'épaisseur d'oxyde gravé en fonction du flux d'O₂ et pour différents types de circuit

3.4.4.3 La variation d'épaisseur de diélectrique

Sur un seul circuit, nous avons mesuré des écarts d'épaisseurs de résine entre deux motifs différents après le procédé de fluage et après etch-back. Nous quantifions l'influence du flux d'oxygène et du ratio sur les écarts d'épaisseurs. La figure 3-18 montre qu'un ratio fort accroît les écarts d'épaisseurs d'oxyde.

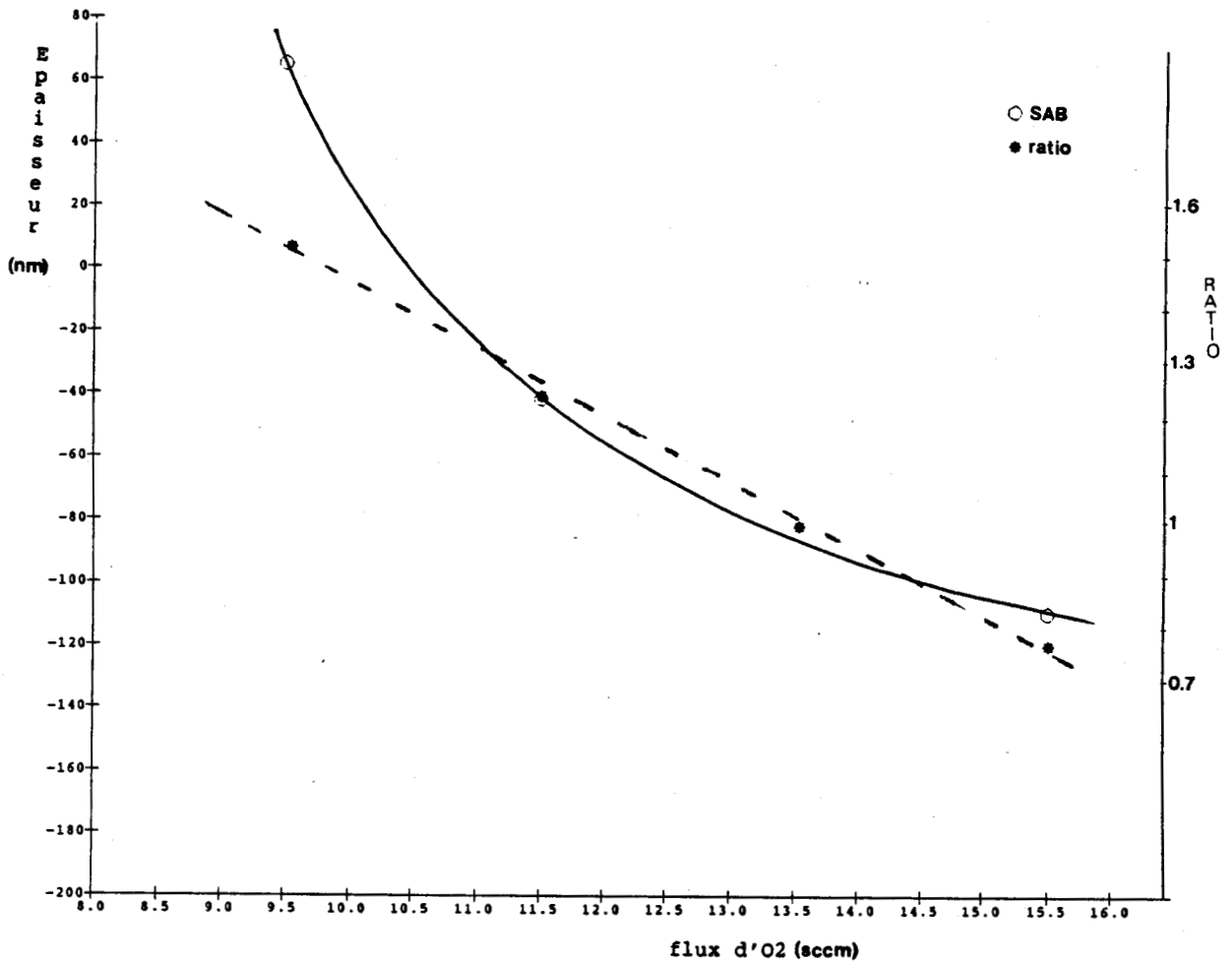


Figure 3-18 : Variation de l'écart d'épaisseur d'oxyde en fonction du flux d'O2

3.5 Conclusion

Nous venons d'optimiser un procédé de gravure qui tient compte de l'effet de charge intervenant au cours de l'etch back. Nous avons ensuite contrôlé la qualité de la planarisation du diélectrique avec une gravure sèche en temps fixe. En résumé, un ratio des vitesses de gravure (V_{ox} / V_{res}) élevé est favorable à la diminution des hauteurs de marche. En contrepartie, il accroît les écarts de diélectrique reposant sur des motifs de différentes tailles. En ce qui concerne l'influence de la densité des circuits, nous avons noté qu'en passant d'une densité de 33% à 80%, nous diminuons la hauteur de marche de 80nm, ce qui est acceptable. Par contre, nous augmentons dans le même temps l'épaisseur d'oxyde gravé de 100nm. Pour diminuer cette différence liée à l'effet de charge, que subit la vitesse de gravure de la résine au cours de l'etch back, nous introduirons, dans le procédé final, une détection de fin d'attaque automatique liée à la disparition de la résine.

CHAPITRE 4

LE PROCEDE SUBILO

4.1 Introduction

Ce chapitre concerne l'application de l'étape de planarisation à un procédé bipolaire à isolement par oxyde ; soit, le procédé Subilo industrialisé chez Philips, à Caen, depuis le début des années 80.

Le procédé Subilo est adapté pour réaliser des circuits intégrés bipolaires ayant une forte densité d'intégration (500 composants/mm²) et fonctionnant en haute fréquence (fréquence de transition des transistors NPN de 7.5 GHz). Il permet la réalisation des diodes schottky, des capacités, des résistances, et des transistors NPN, PNP latéraux et PNP verticaux avec le collecteur relié au substrat.

Dans le procédé Subilo, l'isolement par oxyde diminue considérablement la place occupée par les transistors, comparé à un isolement par jonction. Cependant l'isolement par oxyde engendre des perturbations au niveau de la surface qui sont peu favorables à la réalisation de deux ou trois niveaux de métallisation. C'est la raison pour laquelle nous sommes amenés à introduire une ou plusieurs étapes de planarisation dans ce procédé.

Après une description du procédé Subilo, nous évaluerons la qualité de la planarisation appliquée au diélectrique recouvrant le premier niveau de métallisation. Nous réaliserons une étude de faisabilité, puis nous comparerons les performances électriques des procédés Subilo planarisés et non planarisés.

4.2 Présentation du procédé Subilo

4.2.1 Description générale

Le procédé Subilo à isolement par oxyde, comporte deux ou trois niveaux de métallisation. Le schéma de la figure 4-1 présente les empilements.

Sur des plaques de silicium de plan $\langle 111 \rangle$, une couche épitaxiale dopée n est déposée en phase gazeuse. Dans cette dernière sont réalisés les transistors et leur isolement. Nous passons ensuite à la partie appelée "bicouche", qui correspond à la réalisation des niveaux d'interconnexions et qui comprend les dépôts suivants :

- Le dépôt par sputtering du premier niveau de métallisation, appelé IN1, qui est constitué d'une couche de TiW de 150nm d'épaisseur nécessaire à la formation de diodes schottky, et d'une couche d'AlSi(1%)Cu(2%) de 700nm d'épaisseur.
- Le dépôt par PECVD d'un oxyde dopé au phosphore (3 à 5% de P₂O₅), appelé CO₂, que nous planariserons. Son épaisseur est dans le procédé actuel de 1000nm.
- Le dépôt par sputtering du second niveau de métallisation, appelé IN2, qui ne comprend qu'une couche d'AlSi(1%)Cu(0.03%) de 1500nm d'épaisseur.

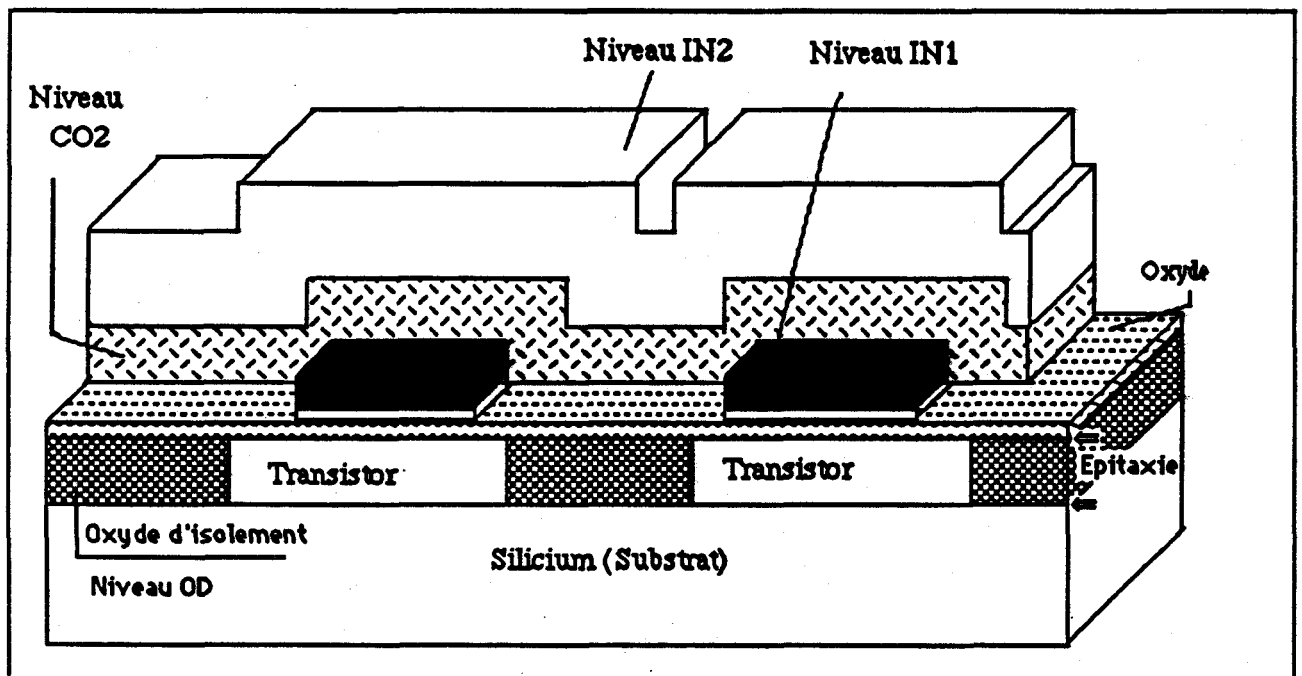


Figure 4-1 : Schématisation de l'empilement des différentes couches

4.2.2 Etude de la topographie

4.2.2.1 Description de la topographie après certaines étapes de procédé

a) Réalisation de l'isolement des transistors (étape OD)

L'isolement des transistors est basé sur un procédé "buried" LOCOS. Les parties actives sont masquées. Le silicium est gravé et durant l'oxydation longue, des têtes d'oiseau se forment. La gravure humide du silicium pour des substrats d'orientation $\langle 111 \rangle$ engendre des pentes dissymétriques dans le plan $\langle 110 \rangle$. Par conséquent, après l'oxydation longue (Etape OD), les têtes d'oiseau formées sont dissymétriques comme le présente les photos MEB de la figure 4-2. Le "cou" d'une des têtes d'oiseau forme un angle rentrant.

b) Réalisation des interconnexions

Ayant réaliser le premier niveau de métallisation, étape IN1, nous observons sur les photos MEB de la figure 4-3, des amincissements de la couche de métallisation au passage de ces têtes d'oiseau à angle rentrant. L'amincissement peut être de 50% dans le pire des cas, ce qui correspond à la limite acceptable.

La situation est encore plus critique pour le second niveau de métallisation, étape IN2, dans les deux cas suivants :

- 1- Lorsqu'un conducteur IN1 s'arrête à proximité du "cou" abrupte d'une tête d'oiseau, des problèmes de recouvrement se posent au niveau du diélectrique, puis au niveau de la seconde couche de métallisation (voir la figure 4-4a).
- 2- Mais le problème s'aggrave lorsqu'il y a coïncidence entre la tête d'oiseau et l'arrêt d'un conducteur IN1 au niveau du "cou" de la tête d'oiseau. Le diélectrique, déposé sur cette structure, forme un angle rentrant trop important pour être recouvert convenablement par une deuxième couche d'aluminium (voir la figure 4-4b).

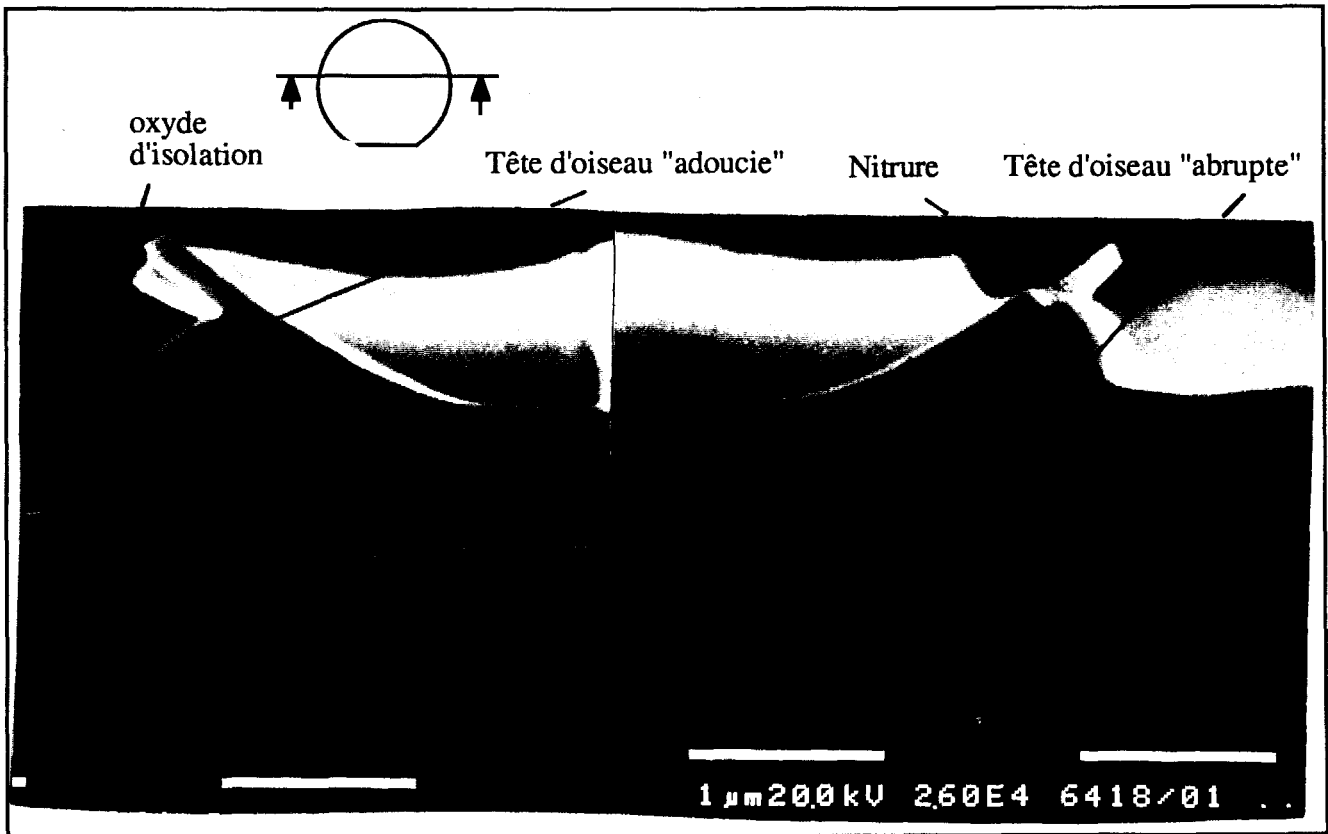


Figure 4-2 : Dissymétrie des têtes d'oiseau

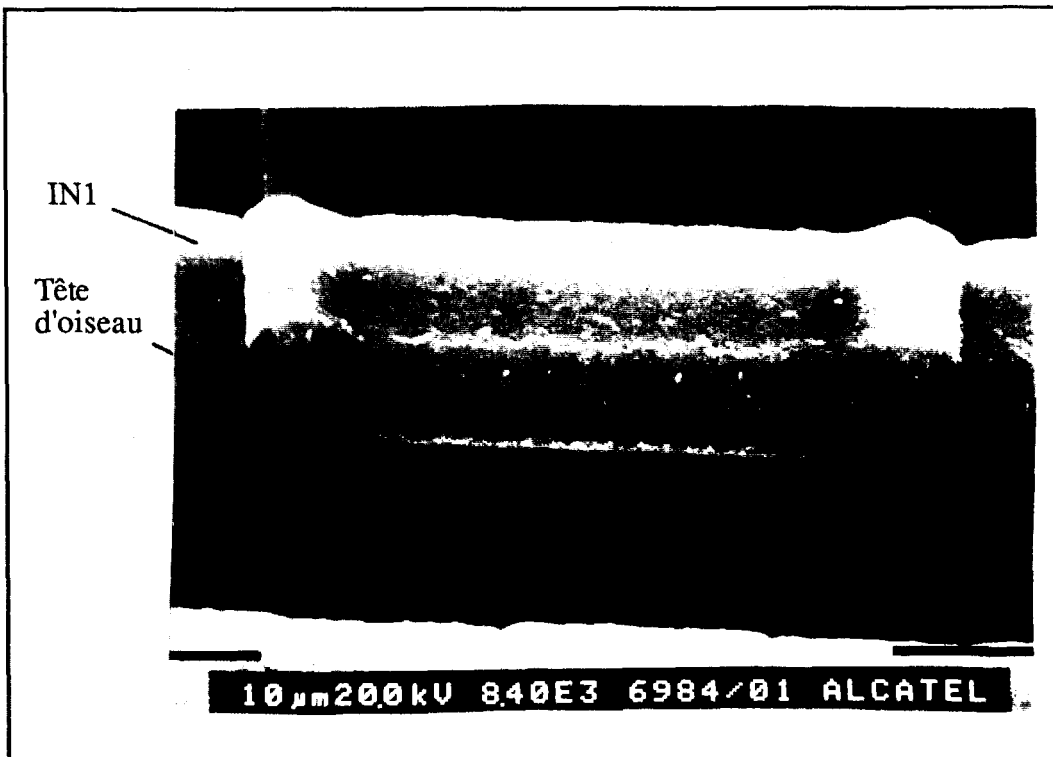
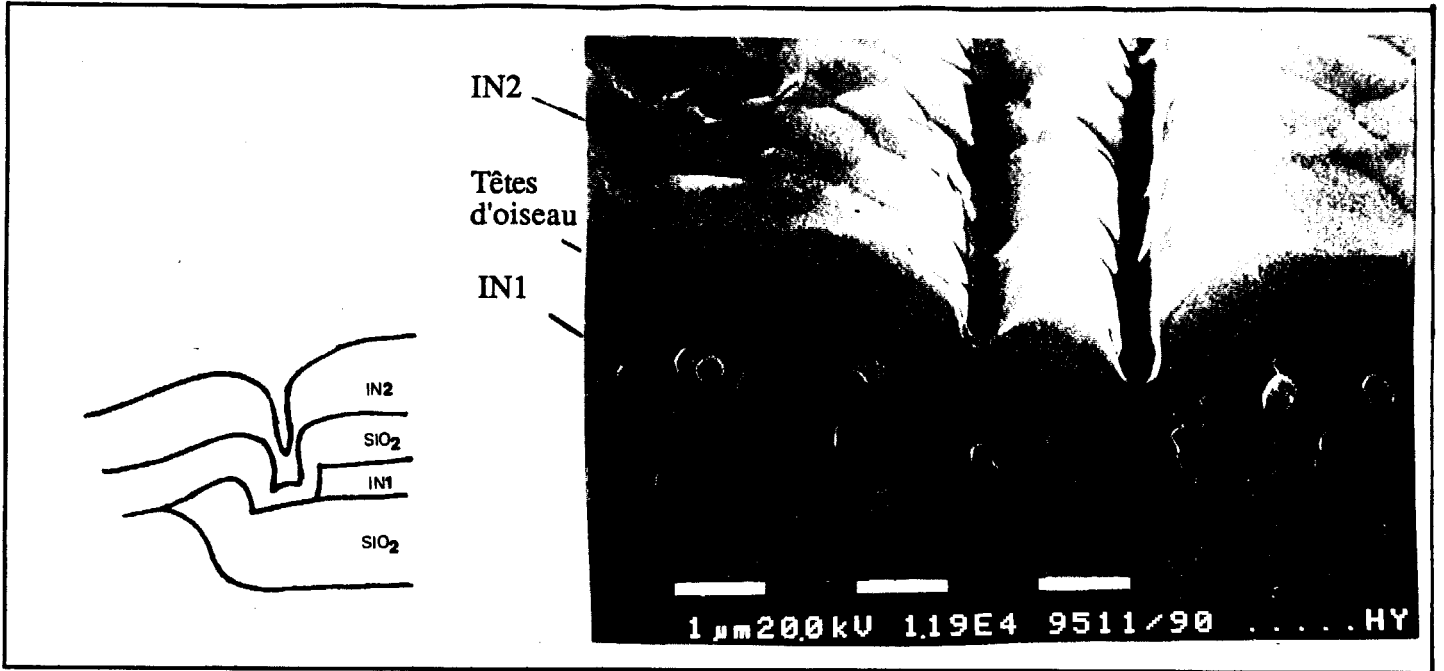
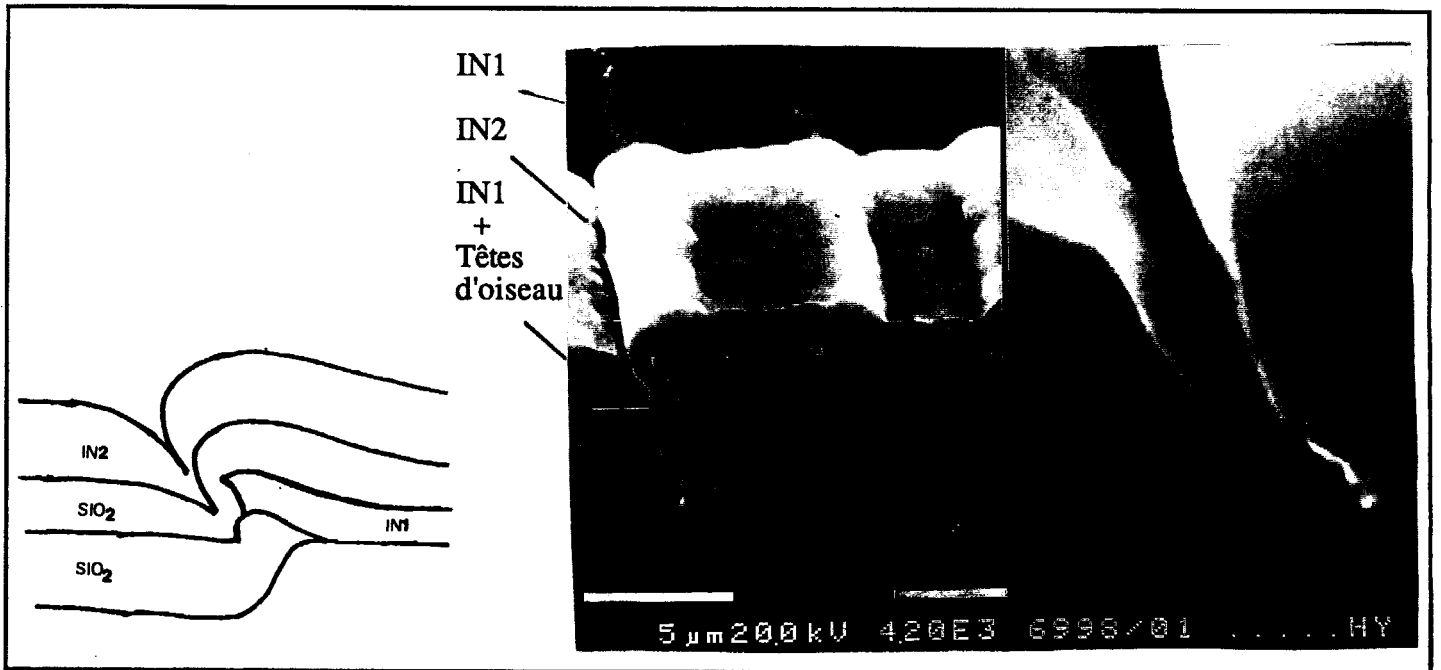


Figure 4-3 : Couverture des têtes d'oiseau par le premier niveau de métallisation



a) Conducteur s'arrêtant à proximité d'une tête d'oiseau



b) Premier niveau d'interconnexions surplombant une tête d'oiseau

Figure 4-4 : Cas critiques de couverture de marche par le second niveau de métallisation

4.2.2.2 Les modifications possibles du procédé

Pour éviter tous les risques de coupures du second niveau de métallisation, deux solutions sont proposées :

- 1) Modifier les règles de topologie pour éviter la coïncidence
- 2) Planariser le diélectrique situé entre IN1 et IN2

La première solution présente les inconvénients suivants :

- a) Elle entraîne la révision des masques de photolithographie pour tous les circuits en cours.
- b) Aux règles de dessin existants, s'ajouterait une contrainte supplémentaire qui va dans le sens contraire d'une densification des niveaux de métallisation.
- c) Dans les étapes de photolithographie, des distorsions peuvent entraîner des alignements légèrement différents d'un endroit à un autre sur une même plaque, comme le montrent les photos MEB de la figure 4-5. Dans ces conditions, il est très difficile de définir des règles générales garantissant la continuité du second niveau de métallisation.

La deuxième solution a l'inconvénient d'introduire, dans le procédé existant, des opérations supplémentaires. Mais elle a un avantage considérable, celui de ne pas toucher à la topologie des circuits actuels.

Nous avons donc choisi de faire une étude de faisabilité concernant l'introduction de l'étape de planarisation au procédé Subilo.

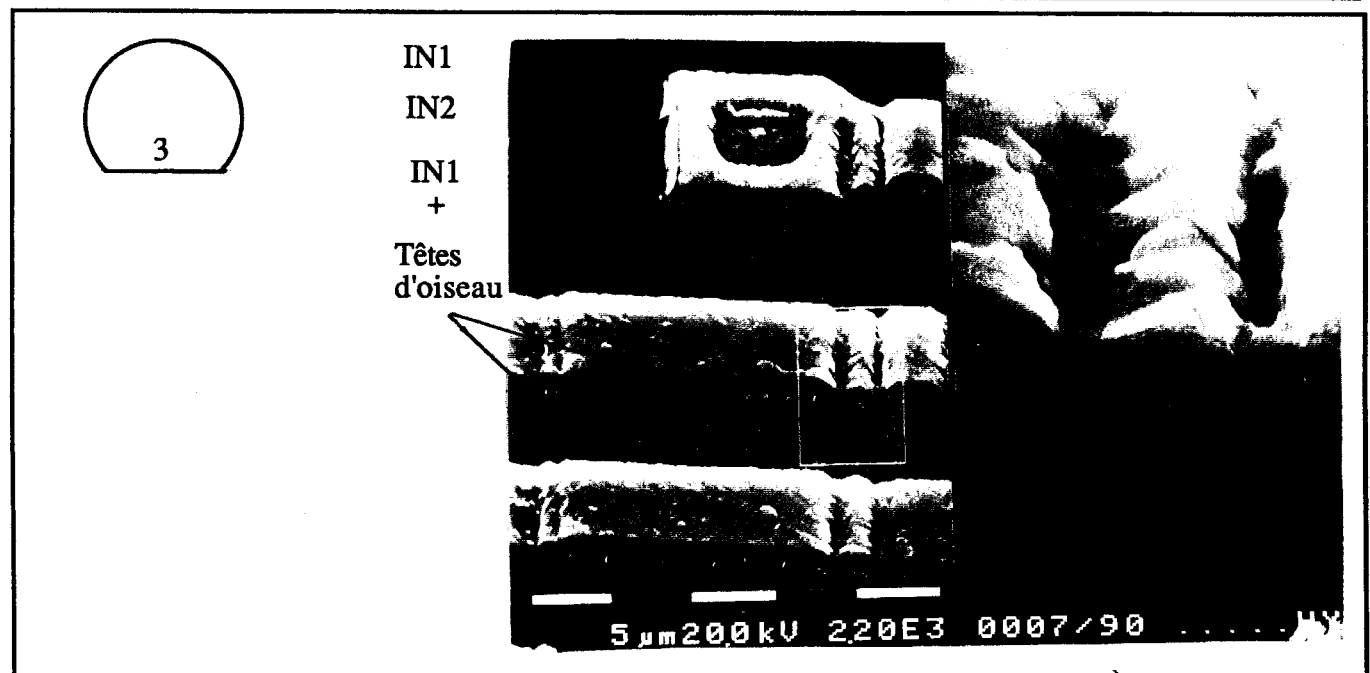
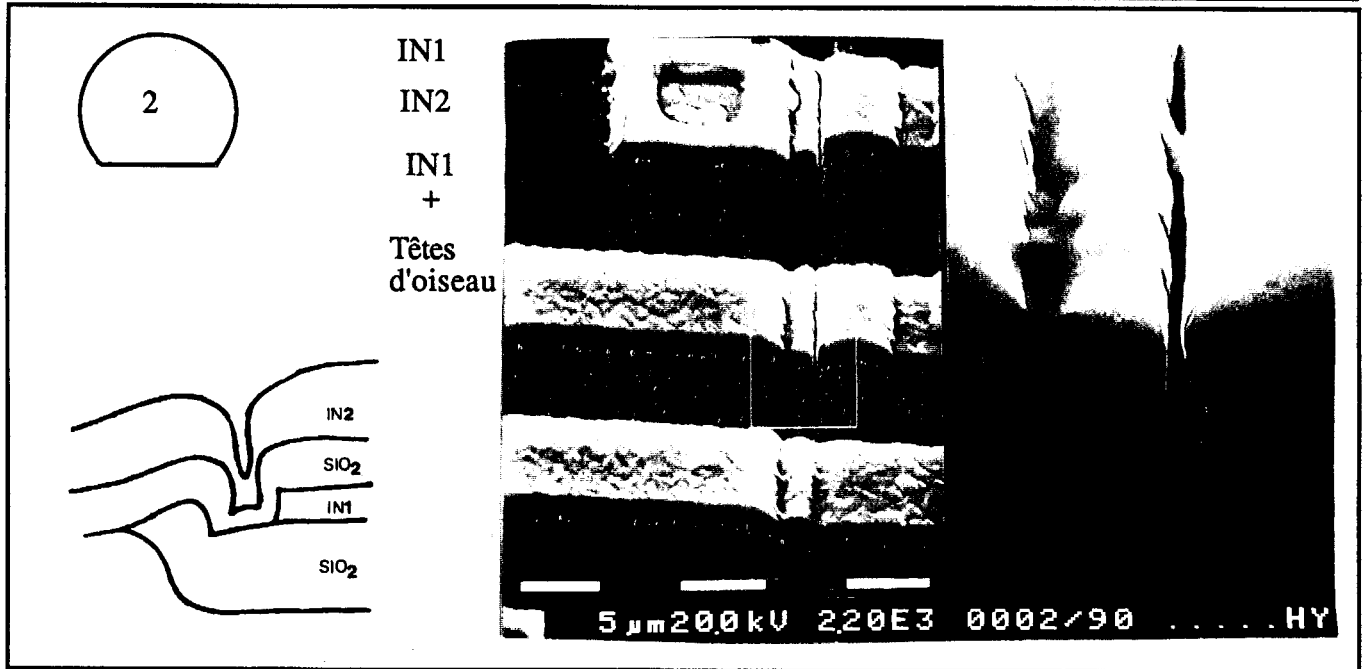
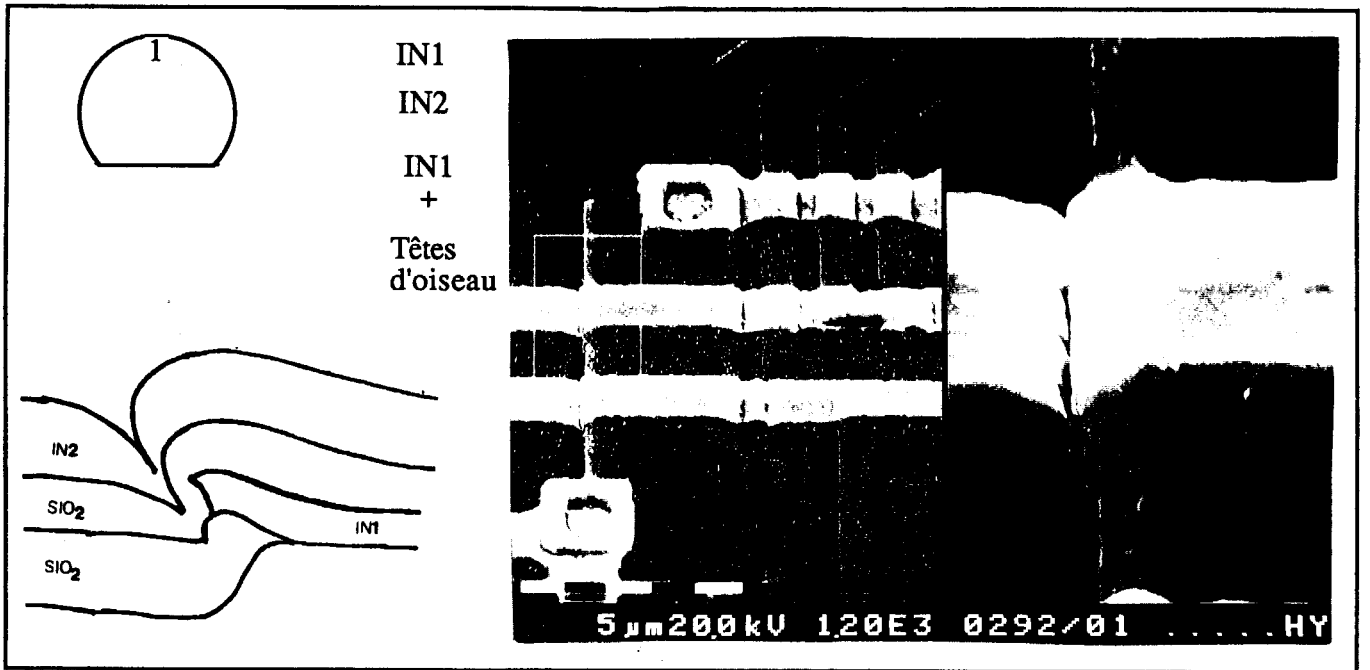


Figure 4-5 · Déplacement des lieux critiques de couverture de marche sur une même plaque

4.3 Planarisation du diélectrique par REB : Résultats topologiques

L'étape de planarisation, étudiée dans les chapitres 2 et 3, est appliquée au diélectrique recouvrant le premier niveau de métallisation. Le diélectrique ainsi planarisé devra alors présenter des hauteurs de marches de 300nm maximales, tout en assurant l'isolation des interconnexions et tout en permettant la réalisation des vias.

4.3.1 Description des opérations

Dans le procédé Subilo, après la réalisation du premier niveau d'interconnexions, nous introduirons l'étape de planarisation. Nous comparerons les résultats topologiques obtenus sur des plaques réelles, après les procédés de fluage et d'etch-back. Les opérations de dépôts, de photo et de gravure supplémentaires sont présentées à la figure 4-6 et décrites ci-après.

1^{ère} opération : Le Dépôt d'oxyde PECVD dopé au phosphore

Nous avons constaté dans la partie 2-1-3 que, dans le cadre d'un etch-back idéal, l'épaisseur d'oxyde à déposer devait être deux fois la hauteur de marche à planariser. Cependant l'apparition de l'effet de charge, au cours de l'etch-back, rend inutile un dépôt d'oxyde de plus de 1400nm pour planariser des hauteurs de marche de 850nm ; hauteurs correspondant aux épaisseurs de TiW (150nm) et d'AlSiCu (700nm).

2^{ème} opération : Le Fluage de la résine HPR204

Le procédé de fluage développé dans le chapitre 2 est appliqué aux circuits réels. L'ensemble des photos MEB de l'annexe 4-1 montre une planarisation quasi-idéale de la surface par la résine. Le premier niveau de métallisation étant gravé en humide, l'oxyde recouvre les lignes d'aluminium sans former d'angle rentrant, favorisant par la même occasion le fluage de la résine.

D'après les épaisseurs de résine spécifiées en annexe 4-1 pour chacun des motifs, nous observons :

- une valeur minimale de 400nm sur un conducteur recouvrant une tête d'oiseau
- une valeur maximale de 2000nm à l'endroit où un conducteur s'arrête sur une tête d'oiseau. La hauteur de marche à planariser est alors de 1200nm.

3^{ème} opération : L'Etch-back

Après l'étape de fluage, les circuits réels subissent le procédé d'etch-back défini dans le chapitre 3, pendant une durée de 370 secondes. A partir des photos MEB de l'annexe 4-2, nous observons les points suivants :

- les hauteurs de marche ne dépassent pas 100nm pour des conducteurs de 10um de large.
- Au passage des têtes d'oiseau, l'aluminium des conducteurs est découvert. Cependant sur un conducteur de 10um de large, réside encore une épaisseur d'oxyde de 300nm après l'etch-back.

L'objectif est d'obtenir après etch-back des hauteurs de marche inférieures à 300nm et une épaisseur d'oxyde moyenne de 500nm, sur l'ensemble des motifs.

4^{ème} opération : Le Dépôt d'oxyde PECVD dopé au phosphore

Nous complétons ensuite la couche de diélectrique par un dépôt d'oxyde de 500nm+/-10%, pour atteindre une épaisseur moyenne finale de 1000nm +/-10%, spécifique au procédé classique. De la même façon, ce dépôt assure une épaisseur de diélectrique minimum sur tous les motifs et garantit une isolation parfaite entre les niveaux de métallisation.

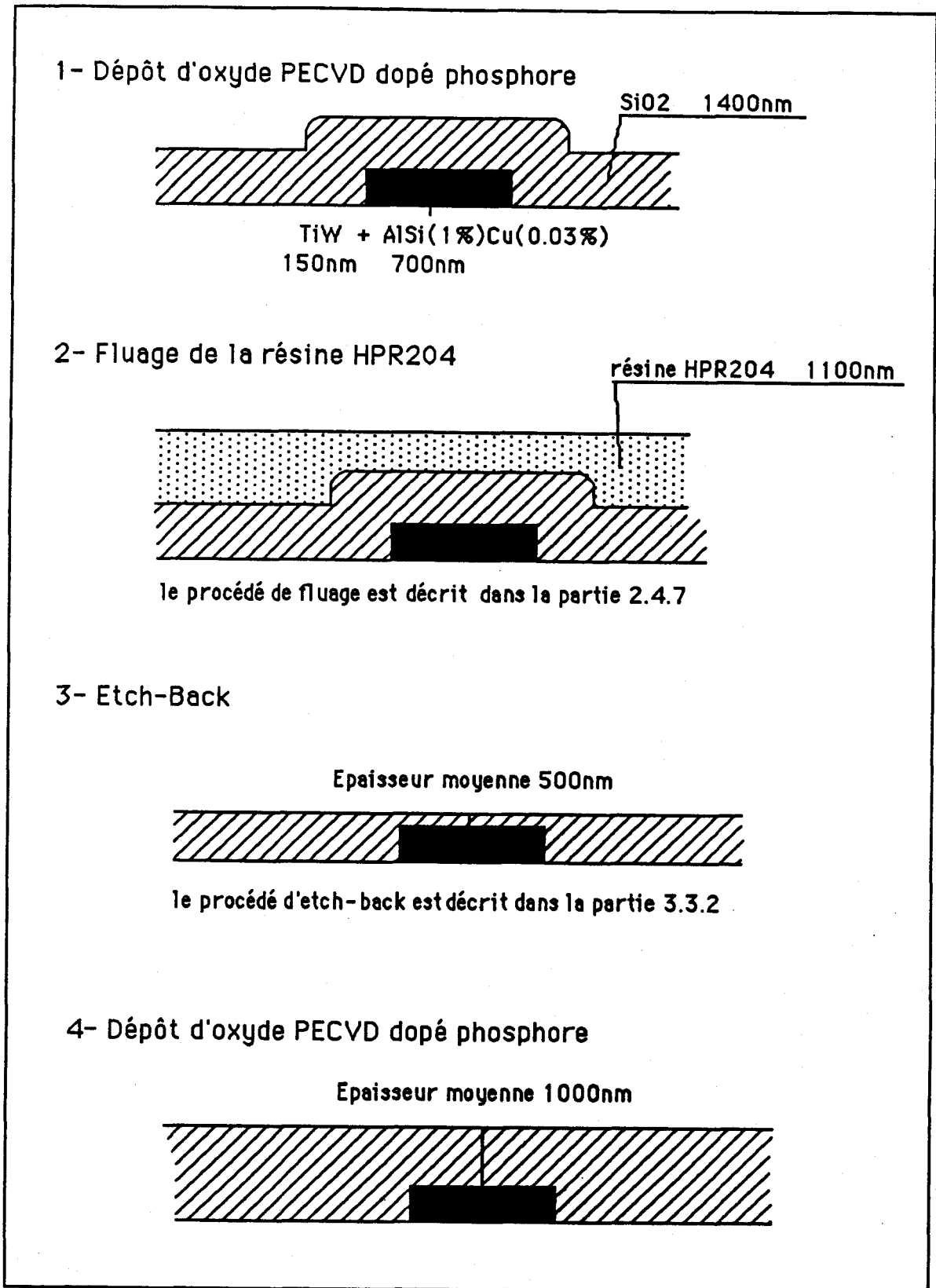


Figure 4-6 : Description de l'étape de planarisation

4.3.2 Contrôle de la qualité de la planarisation au MEB

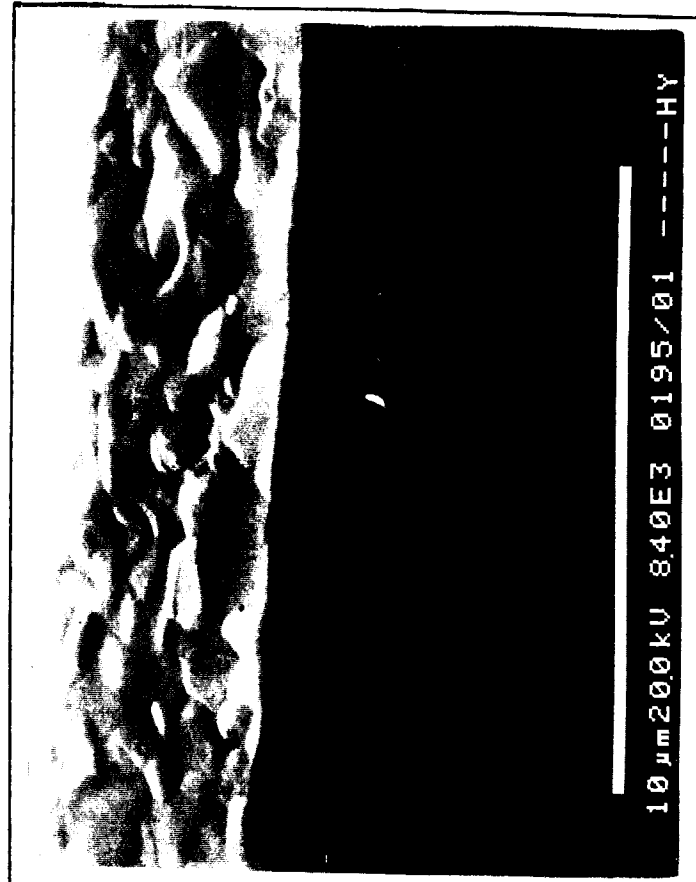
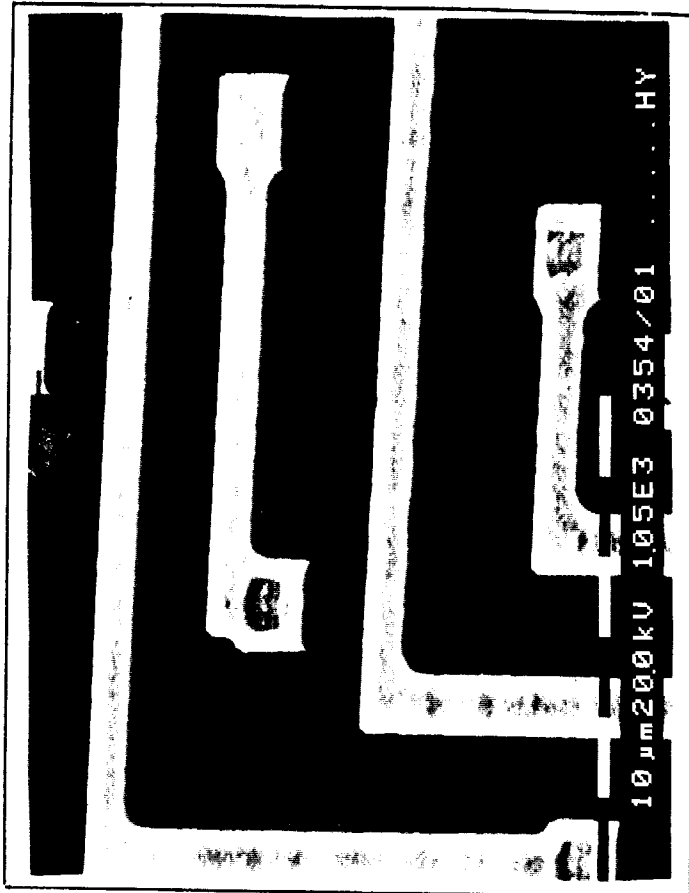
a) Observations en surface :

Sur les circuits Subilo produits actuellement, nous contrôlons régulièrement la qualité de la couverture de marche, après la réalisation du second niveau de métallisation. Sur les photos MEB de la figure 4-7, nous comparons des circuits ayant ou n'ayant pas subis l'étape de planarisation. Nous observons une planéité quasi-idéale du diélectrique planarisé éliminant tous les risques de coupures.

b) Observations en coupe :

Après avoir déposé une couche de passivation, nous observons en coupe la topographie. Les photos de la figure 4-8 présentent les empilements des couches pour des circuits planarisés et non planarisés. Dans le cas le plus critique, correspondant à la coïncidence de la délimitation d'un conducteur IN1 et d'une tête d'oiseau, nous observons après l'étape de planarisation une amélioration considérable de la couverture de marche de l'IN2. La couche de diélectrique planarisée présente une marche maximale de 100nm et son épaisseur sur le niveau IN1 varie de 500nm à 1200nm.

PROCEDE PLANARISE



PROCEDE NON PLANARISE

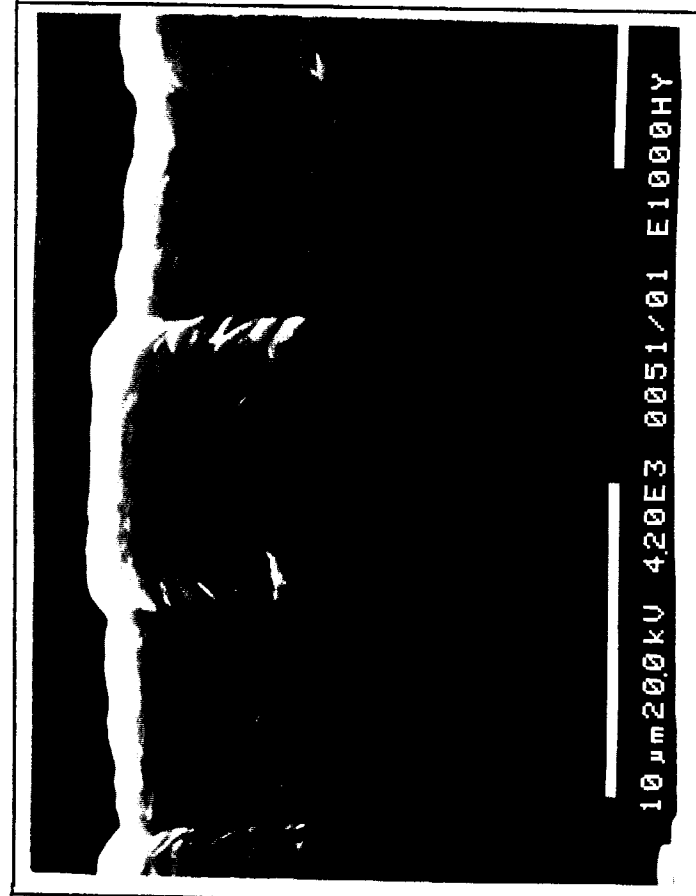
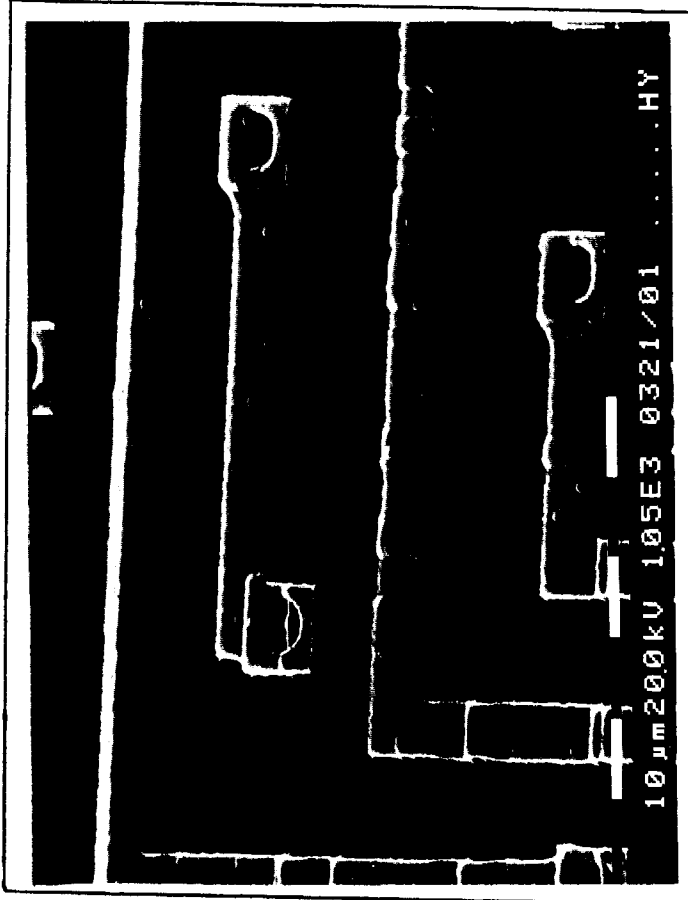
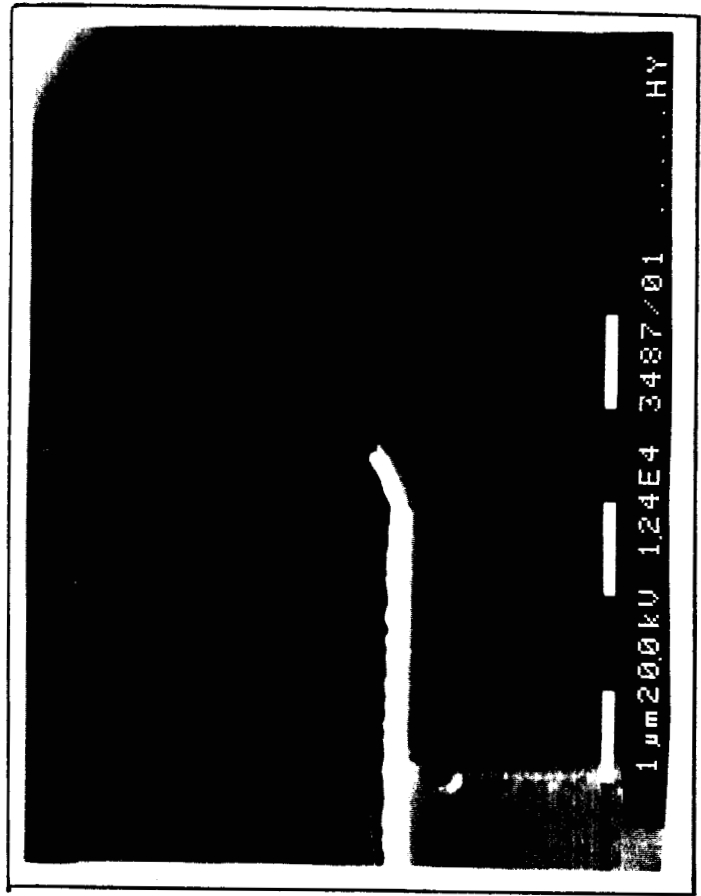
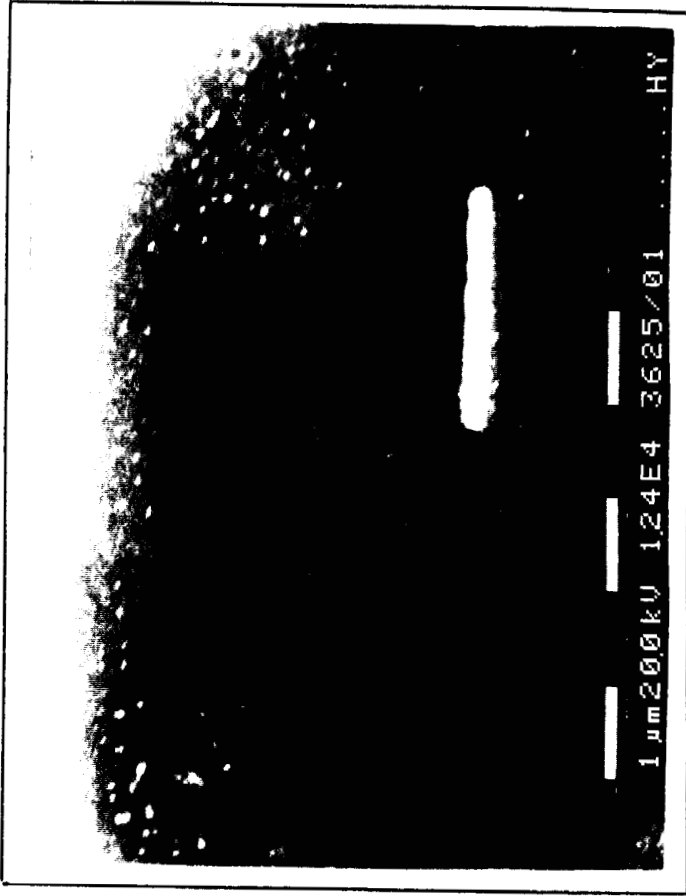


Figure 4-7 : Comparaison des couvertures de marche des conducteurs IN2 sur un diélectrique planarisé ou non planarisé

PROCEDE PLANARISE



PROCEDE NON PLANARISE

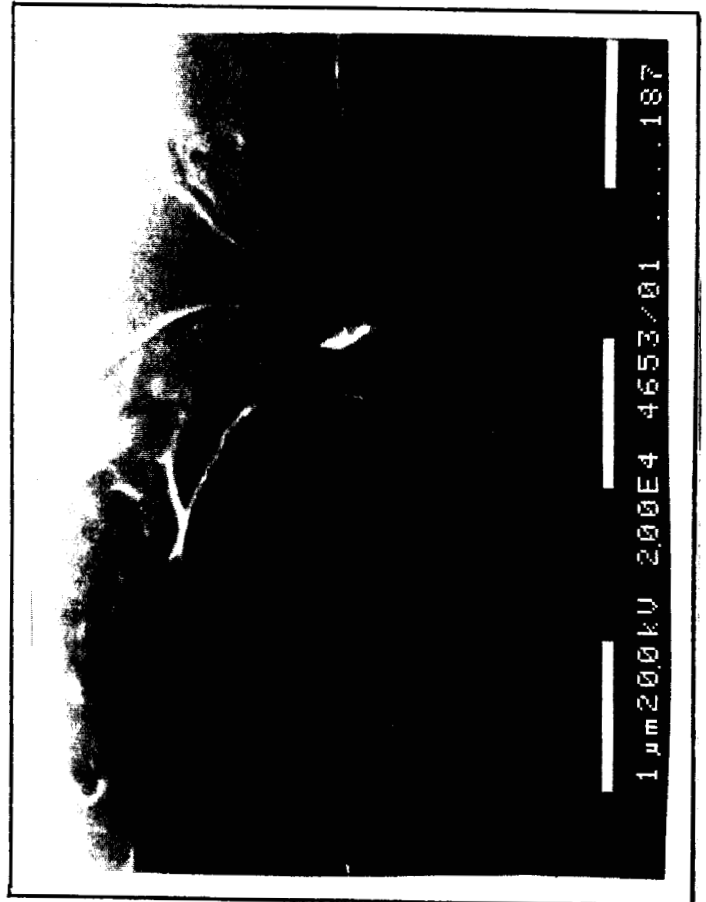
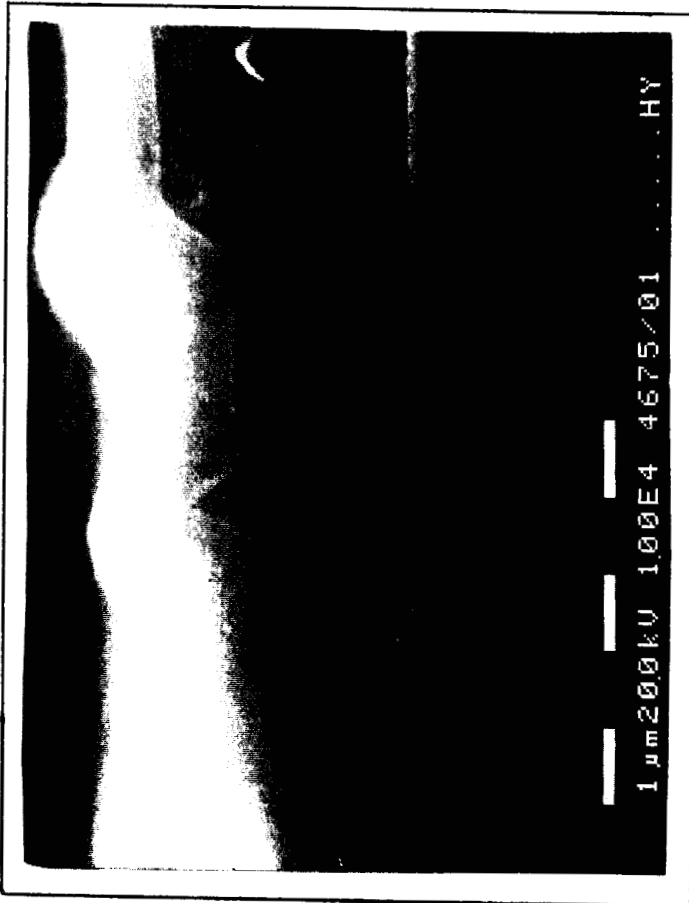


Figure 4-8 : Comparaison des topographies pour les procédés planarisés et non planarisés

Procédé non planarisé : * Révélation des couches par gravure partielle de l'oxyde

Procédé planarisé : * Révélation des couches par gravure partielle de l'aluminium

4.3.3 La reproductibilité de la planarisation :

Pour contrôler le procédé de planarisation en production, nous reprenons les paramètres définis dans la partie 3.3.3 :

- 1) La marche maximale est située au centre de la plaque. Sa valeur, mesurée dans un motif particulier à l'aide d'un profilomètre, ne doit pas excéder 300nm.
- 2) Les épaisseurs d'oxyde maximales, reposant sur les circuits, sont mesurées au bord et au centre de la plaque, sur un motif de silicium avec un nanospec. La norme minimale est de 650nm pour garantir la qualité de la planarisation (voir 3.3.3.2). La norme maximale est de 1150nm pour limiter la profondeur des vias comme nous le verrons dans la partie 4.3.4.3.

Notre objectif est à présent de vérifier la reproductibilité des résultats.

4.3.3.1 Mise au point de la détection de fin d'attaque

a) Son utilité

Au cours de l'etch-back, nous gravons la résine et l'oxyde sur les plaques, mais nous attaquons également l'électrode supérieure en graphite. L'usure de l'électrode est d'environ 4nm par plaque gravée et elle a pour conséquence l'augmentation de la D.I.E. (Distance Inter Electrode). Ce phénomène engendre une diminution des vitesses de gravure résine et oxyde dans le temps. La gravure en temps est donc impossible, et il est nécessaire d'introduire une détection de fin d'attaque automatique (DFA). De plus, l'introduction d'une DFA augmentera la reproductibilité des résultats, suivant la densité des circuits, comme nous l'avons vu dans la partie 3.3.4.

b) La description de l'instrument

L'instrument de détection de fin d'attaque utilisé est un spectromètre d'émission optique dont le synoptique est donné à la figure 4-9. La méthode s'appuie sur l'analyse spectrale de la lumière produite dans le plasma. La luminosité du plasma est due aux atomes excités dans le plasma qui reviennent à leur état stable avec émission de photons. Le système est équipé d'un filtre choisi en fonction de la longueur d'onde caractéristique de la réaction d'interface plasma-couche. Il transmet une courbe de réponse qui révèle les modifications de l'intensité de la raie, correspondant à une décroissance ou un accroissement de la concentration des produits de la réaction. Cette courbe sera utilisée pour détecter la fin d'attaque.

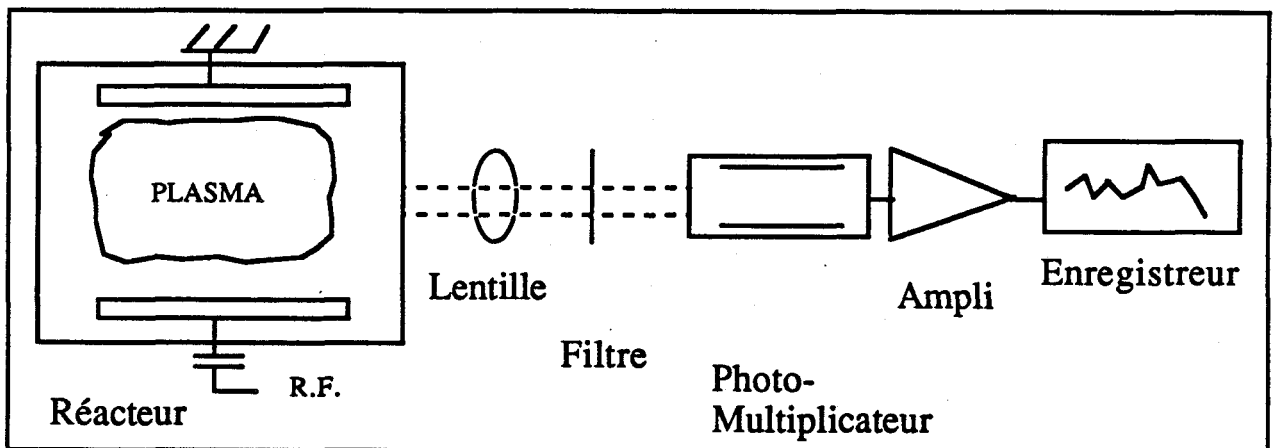


Figure 4-9 : Synoptique d'un système de Détection de fin d'attaque

c) L'application au procédé d'etch-back

Pour le procédé d'etch-back, le filtre choisi sélectionne la longueur d'onde de 483,5nm correspondant à l'émission de photons des molécules CO. Celles-ci étant principalement générées lors de la gravure de la résine (voir partie 3-1), nous pourons détecter le moment où toute la couche de résine est gravée. Ensuite, nous déterminerons le temps d'"overtech", temps supplémentaire de gravure qui permet d'éliminer des restes de résine dans les réseaux.

Après le réglage de l'instrument, nous obtenons une courbe de réponse présentée à la figure 4-10. Le signal commence par croître puis décroît. Pour augmenter la précision de la détection de fin d'attaque, nous utilisons la dérivée première dont la décroissance est brutale. Dès qu'un point atteint -800, le système enregistre la fin d'attaque et commence l'overtech.

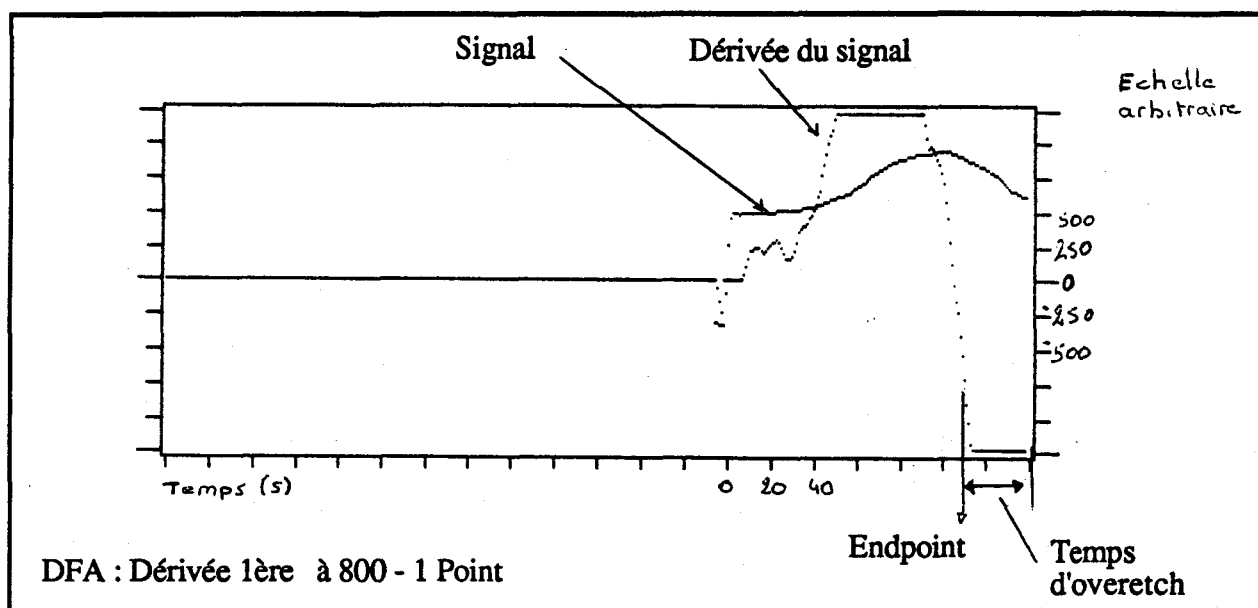


Figure 4-10 : Courbe de Détection de Fin d'Attaque pour un procédé d'etch-back

La résine ayant en grande partie disparu au moment de la détection, nous gravons, pendant le temps d'overetch, essentiellement de l'oxyde. Or la vitesse de gravure de l'oxyde, déterminée par un contrôle hebdomadaire, varie en fonction de l'usure de l'électrode. Pour garantir une épaisseur d'oxyde après etch-back, peu dispersée de plaques à plaques, nous adaptons le temps d'overetch (Tover) suivant la vitesse de gravure de l'oxyde en suivant les règles suivantes :

1er cas : $V_{ox} > 430\text{nm/min}$ \Rightarrow Tover = 30secondes

2ème cas : $330\text{nm/min} < V_{ox} < 430\text{nm/min}$ \Rightarrow Tover = 60secondes

3ème cas : $V_{ox} < 330\text{nm/min}$ \Rightarrow Tover = 80secondes

4.3.3.2 Résultats de reproductibilité

En production, les plaques de silicium 125mm sont processées par lot de 24 plaques. Ayant réalisé l'étape de planarisation sur 17 lots sur une période de deux mois, nous avons mesuré :

- la hauteur de marche : deux plaques par lot et une mesure par plaque.
- l'épaisseur de diélectrique restant : deux plaques par lot et deux mesures par plaque.

Les mesures résultantes sont représentées sous la forme d'histogrammes présentés à la figure 4-11.

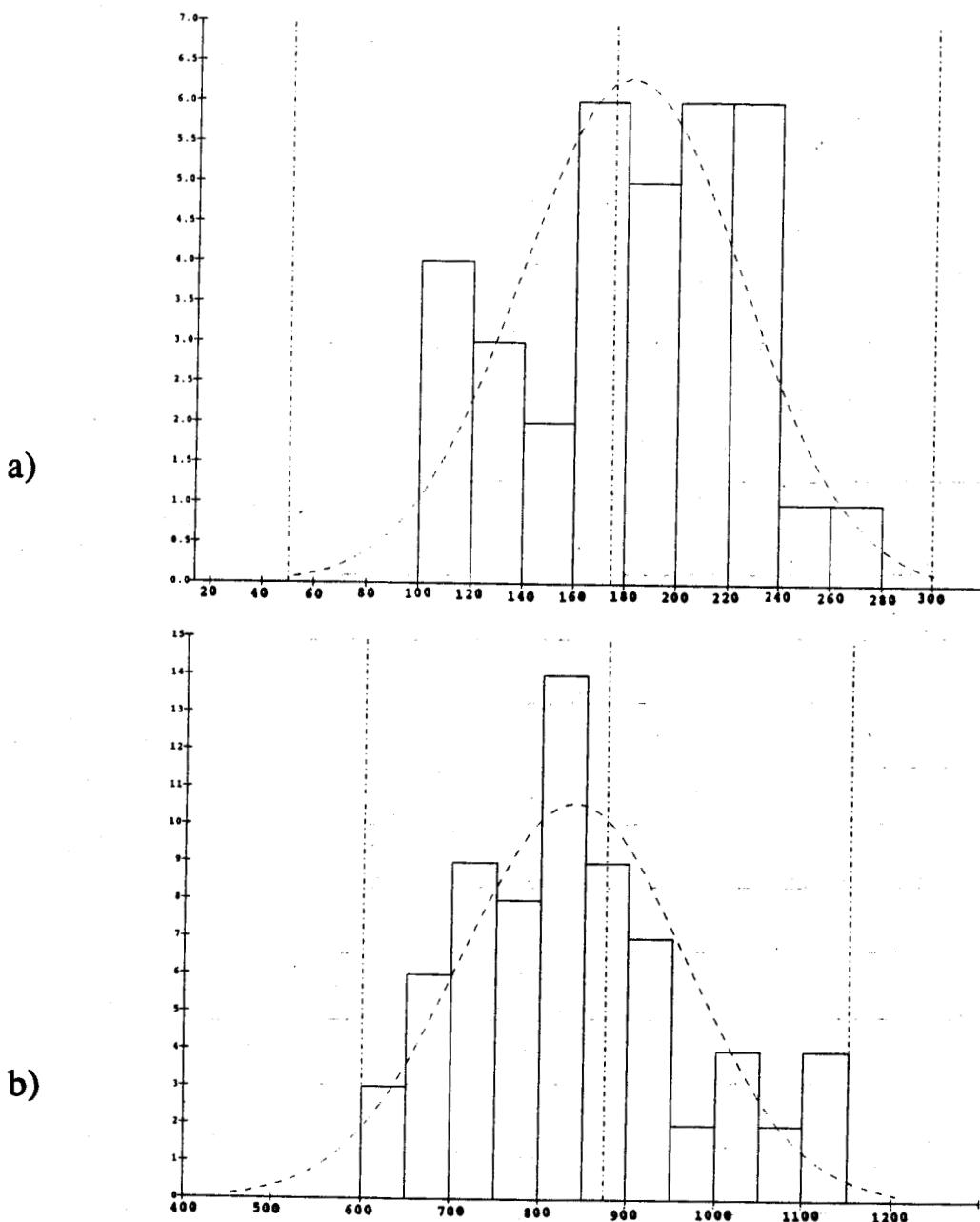


Figure 4-11 : Histogrammes a) des mesures de hauteur de marche
b) des mesures de diélectrique

Toutes les hauteurs de marches sont dans les normes, c'est-à-dire entre 50nm et 300nm. La valeur moyenne est 180nm et l'écart type vaut 43nm. La représentation de la distribution gaussienne montre que le paramètre est bien centré et que la queue de distribution sort très peu des normes fixées. Par conséquent, la hauteur de marche n'est pas un paramètre critique dans le procédé de planarisation. Quel que soit le circuit, nous garantissons une hauteur de marche finale inférieure à 300nm.

Les valeurs d'épaisseur d'oxyde, restant après l'etch-back, sont dans les normes fixées à 600nm et 1150nm, mais elles balayent toute la gamme. La valeur moyenne est 840nm et l'écart type vaut 130nm. La distribution gaussienne correspondante montre une large partie de la queue de distribution en dehors des normes. L'épaisseur d'oxyde est donc un paramètre critique.

En fait, l'épaisseur d'oxyde résultant après etch-back, dépend des étapes de dépôt et de gravure. Les dispersions d'épaisseur se répartissent de la façon suivante :

- Dépôt d'oxyde 1400nm +/-10% , soit $\Delta = 280$ nm
- Dispersion d'épaisseur d'oxyde autorisée $\Delta = 450$ nm
- Reste pour la gravure $\Delta = 170$ nm

Or après l'etch-back, nous avons classiquement une dispersion d'épaisseur d'oxyde, entre le bord et le centre de la plaque, de 100nm due aux dispersions de vitesses de gravure. Par conséquent, pour le reste des imprécisions de gravure liées aux vitesses de gravure et à la détection de fin d'attaque, il ne reste qu'une marge de 70nm. La principale cause de cette situation critique est la dispersion d'épaisseur d'oxyde déposé que nous réduirons de moitié par l'introduction d'un nouvel équipement de dépôt.

En conclusion, la reproductibilité dans le temps et suivant les densités des circuits, est garantie pour la hauteur de marche. Elle est à surveiller pour l'épaisseur finale de diélectrique.

4.3.4 Compatibilité avec la réalisation des vias

Nous appelons "vias", les ouvertures réalisées dans la couche de diélectrique pour mettre en contact électrique deux niveaux de métallisation. Pour réaliser ces vias sur des circuits ayant subi l'étape de planarisation, il faut pouvoir graver par plasma des épaisseurs d'oxyde variant de 500nm à 1750nm, toutes dispersions confondues. Nous vérifierons donc dans les paragraphes suivants les points ci-dessous :

- 1- La dispersion d'épaisseur d'oxyde suivant la taille des motifs d'aluminium ne doit pas rendre impossible la détection de fin d'attaque de la gravure des vias. De plus, elle ne doit pas engendrer des sous gravure excessives des vias.
- 2- L'épaisseur d'oxyde maximale gravée ne doit pas engendrer de problème de couverture de marche par le second niveau de métallisation.

4.3.4.1 La détection de fin d'attaque

La gravure des vias se fait par plasma dans le même équipement utilisé pour la gravure "etch-back". Le système de détection de fin d'attaque est identique à celui utilisé en planarisation. Placé également sur la raie 483nm, la chute du signal indique le moment où l'oxyde a disparu. Toutes les dispersions d'épaisseur d'oxyde engendrées par l'étape de planarisation nuisent à l'obtention d'un signal de fin d'attaque franc, mais la détection reste fiable.

4.3.4.2 la sous gravure des vias

La taille minimum des vias est de 4,5 μ m sur masque. Un tel via peut aussi bien être placé sur un petit plot d'aluminium de 100 μ m², que sur une large plage d'aluminium correspondant à une capacité IN1/IN2. Or, la différence d'épaisseur d'oxyde à graver est de 700nm. Par conséquent, pour ouvrir convenablement les vias placés sur des larges surfaces d'aluminium, nous devons surgraver les vias localisés sur les petits motifs d'aluminium. Pour évaluer la sous gravure résultante, nous mesurons les côtes d'un via avant et après gravure, avec un équipement de mesure dimensionnel (Hitachi).

Les mesures sont faites sur des vias de $20\mu\text{m}^2$ situés sur deux motifs d'aluminium présentés à la figure 4-12.

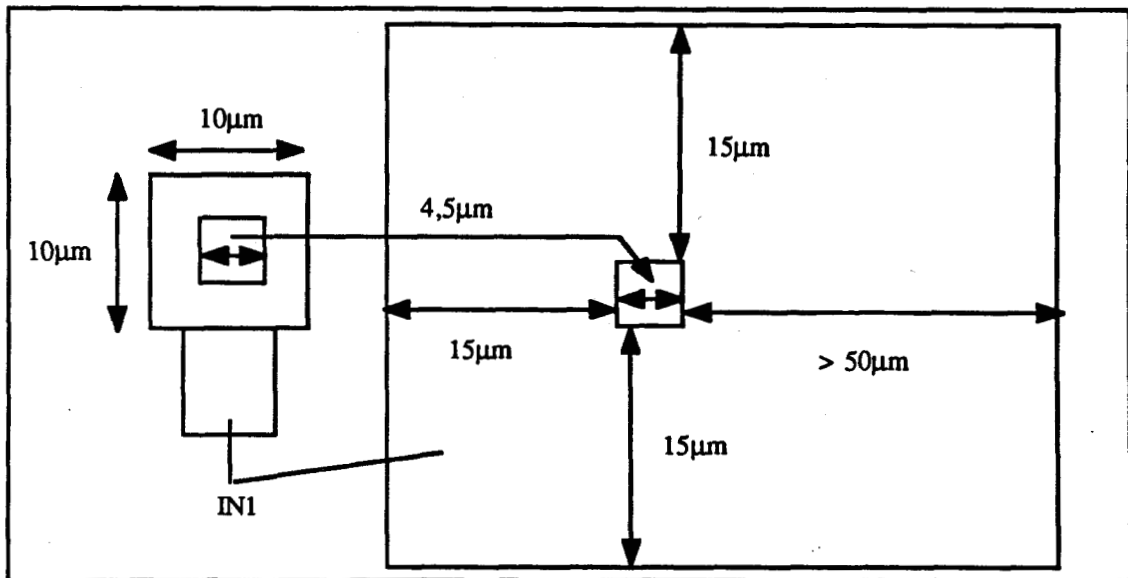


Figure 4-12 : Lieux de mesures des côtes des vias

La sous gravure obtenues sur le petit motif d'IN1 est de $0,56\mu\text{m}$ par bord, et sur le large motif d'IN1 de $0,35\mu\text{m}$ par bord. La différence de sous gravure est donc de $0,21\mu\text{m}$. Or les règles de lay-out actuelles du procédé Subilo permettent une sous-gravure des vias de $1,5\mu\text{m}$ par bord. Par conséquent, la surgravure de certains petits vias liée à l'étape de planarisation ne pose pas de problème.

4.3.4.3 La profondeur des vias

Les épaisseurs de diélectrique autorisées sont comprises entre 500nm à 1750nm . Nous devons cependant vérifier que pour un via de 1750nm , la couverture de marche du second niveau de métallisation est correcte. Une observation MEB en coupe a donc été effectuée sur un circuit ayant une épaisseur de diélectrique maximale. Les photos MEB de la figure 4-13 montrent que les vias forment une pente de 60° . Cette pente est donc suffisamment douce pour éliminer tout risque de coupure de bande d'aluminium.

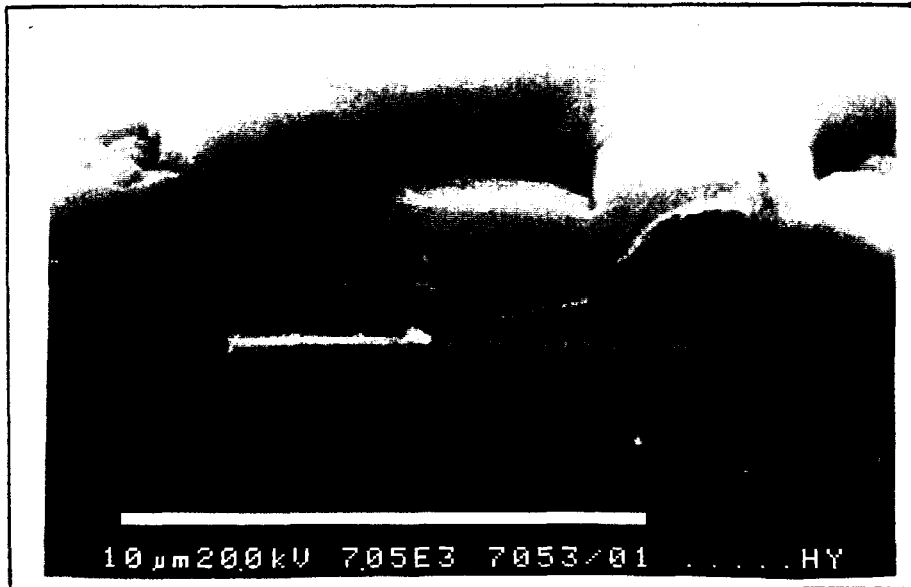


Figure 4-13 : Couverture de marche de l'IN2 dans un vias de 1300nm

4.3.5 Conclusion

Pour augmenter la qualité des circuits Subilo, nous avons appliqué l'étape de planarisation par REB (Resist Etch Back) au diélectrique isolant les deux premiers niveaux d'interconnexions. Nous avons vu qu'après le traitement de fluage, la résine planarise parfaitement tous les motifs. De plus, après l'étape d'etch-back, les hauteurs de marches ne dépassent plus 300nm. Ce paramètre "hauteur de marche", contrôlé sur tous les circuits, est très reproductible dans le temps et quel que soit la densité des circuits. Sur la topographie plane obtenue, le second niveau de métallisation ne présente alors plus aucun amincissement, ni aucun risque de coupure, même dans les situations les plus critiques. La qualité de la planarisation appliqué au procédé Subilo répond donc au cahier des charges. En introduisant cette étape de planarisation, nous ne modifions globalement rien au procédé, mise à part l'épaisseur de diélectrique. Dans le procédé classique, l'épaisseur est de 1000nm \pm 10%. Avec le procédé planarisé, le diélectrique est réalisé en deux fois et l'épaisseur finale varie de 1150nm à 1750nm sur les larges motifs et de 500nm à 950nm sur les lignes d'aluminium isolées. Cependant ces épaisseurs de diélectrique sont compatibles avec l'étape de réalisation des vias (Etape CO2). Par conséquent, le procédé Subilo planarisé est faisable et nous étudierons l'influence de l'étape de planarisation sur les caractéristiques électriques du procédé Subilo dans les parties suivantes.

4.4 Planarisation du diélectrique par REB : Résultats électriques

Dans les paragraphes suivants, nous comparons les résultats électriques du procédé Subilo planarisé et du procédé Subilo standard. Nous examinons, dans un premier temps, tous les paramètres liés à la qualité du multicouche (résultats PCM, test d'électromigration). Puis nous étudions l'influence de l'étape de planarisation sur le fonctionnement des circuits.

4.4.1 Les caractéristiques du bicouche

4.4.1.1 Présentation du PCM (Process Module Control)

Chaque plaque processée comporte cinq circuits appelés PCM, disposés à des endroits bien spécifiques de la plaque. Ces circuits comprennent des éléments de base nous permettant de vérifier, à partir des mesures électriques, que les caractéristiques physiques sont dans les spécifications du procédé. Le PCM, décrit en annexe 4-3, contient des transistors, des diodes, des motifs de mesure de "résistance carrée", mais aussi d'autres motifs servant à contrôler la qualité du multicouche.

Les paramètres caractéristiques du multicouche sont les suivants :

- Les résistances de conducteurs IN1, IN2, IN3 (Rin1, Rin2 et Rin3). Elles sont mesurées en injectant un courant de 1mA dans un conducteur en forme de serpent.
- Les isolations entre les connexions de même niveau Is11, Is22 et Is33. Elles sont vérifiées dans le même motif, en appliquant une tension de 10V entre le conducteur en serpent et une grille métallique.
- Les isolations entre les niveaux de métallisation (Is12 et Is23). Elles sont testées en appliquant une tension de 20V au bornes de deux larges plots métalliques.
- Les résistances de contact ou vias, entre deux niveaux de connexions. Elles sont mesurées en injectant un courant de 1mA dans un ensemble de 300 vias de $3\mu\text{m}^2$ et placés en parallèle.

4.4.1.2 Comparaison des résultats PCM

Les paramètres caractéristiques du multicouche sont mesurés dans les PCM sur 19 lots planarisés, huit bicouches et onze tricouches. Dans le tableau 4-14, les valeurs obtenues sont comparés aux moyennes et écart-types mensuels de lots non planarisés (500 lots).

Nous notons deux différences concernant :

- 1- La résistance Rin2. Elle est réduite d'environ 3Ω , soit de 10%, après l'étape de planarisation. L'explication est la suivante : les amincissements des conducteurs IN2 liés à une mauvaise couverture de marche ont disparu. La section du conducteur est donc constante entraînant une résistance plus faible.
- 2- La résistance de contact entre le premier et le second niveau d'interconnexions (Rvia12). Elle est environ deux fois plus élevée pour le procédé planarisé ; conséquence de contacts plus profonds.

Cependant nous constatons qu'avec l'introduction de l'étape de planarisation, nous restons dans les normes de spécifications du procédé Subilo.

Paramètres	Procédé Planar		Procédé Classique		Normes	
	Moy	Ecart	Moy	Ecart	Min	Max
Rin1 (Ω)	221,3	15,7	215,1	17,3	200	350
Rin2 (Ω)	28,9	1,7	31,1	2,2	20	50
Rin3 (Ω)	11,6	0,7	11,8	0,9		
Is11 (nA)	0,8	13	0,3	8,3		10
Is22 (nA)	0,02	0,48	0,01	0,27		10
Is33 (nA)	0,04	0,16	0,02	0,16		10
Is12 (nA)	0,02	0,64	0,03	8,36		50
Is23 (nA)	0,06	0,57	0,04	0,56		50
Rvia12 (Ω)	50,9	2,1	25,4	2,3	10	100
Rvia23 (Ω)	26,7	14,3	25,4	8,0		

Figure 4-14 : Comparaison des caractéristiques du multicouche pour les procédés Subilo Planarisé et Standard

4.4.1.3 Mesures de Capacités

Dans le PCM, le motif servant à tester l'isolation entre les conducteurs IN1 et IN2 peut être utilisé comme une capacité de 0,78mm² de surface (mesure sur masque). Sur les plaques planarisées et non planarisées, nous évaluons la valeur de la capacité avec un testeur programmable contrôlé par ordinateur (Keithley). La figure 4-15 présente les valeurs expérimentales de la capacité en fonction de l'épaisseur de diélectrique. Pour les plaques planarisées, les épaisseurs d'oxyde ont été mesurées au cours du procédé, à partir de la méthode décrite dans la partie 3.1. Au contraire pour les plaques non planarisées, nous nous sommes basés sur les épaisseurs moyennes déposées, contrôlées sur des substrats de silicium. La courbe expérimentale est tracée après avoir réalisé une régression linéaire.

Prenons l'équation de base : $C = \epsilon_0 \epsilon_r S / e$

avec ϵ_0 permittivité absolue valant $8.86 \cdot 10^{-14}$ Farad/cm, S surface de la capacité de $0.78 \cdot 10^{-2}$ cm² et e épaisseur de diélectrique. Nous obtenons une permittivité relative ϵ_r de l'oxyde de silicium de 5.9 au lieu de 3.9 théoriquement. Cette différence provient essentiellement à la détermination imprécise de la surface de la capacité, et aux capacités parasites de cablage, dont nous n'avons pas tenu compte.

Avec le procédé non planarisé, les épaisseurs de diélectriques, sont de 1000nm +/- 10% donnant des valeurs de capacité comprises entre 34pF et 46pF. Avec le procédé planarisé, l'épaisseur d'oxyde est comprise entre 1100nm et 1750nm et les valeurs de capacité varient entre 23pF et 33.5pF. Globalement, avec l'introduction de l'étape de planarisation, nous diminuons de 10pF les valeurs de capacités cependant la dispersion reste du même ordre.

En conclusion, les capacités de surface excédant $50\mu\text{m}^2$, constituées par la couche de diélectrique planarisé située entre les deux niveaux de métallisation, ont des valeurs plus faibles que dans le procédé classique. Cependant ces capacités trop encombrantes et de valeurs trop imprécises sont généralement peu utilisées dans les circuits intégrés.

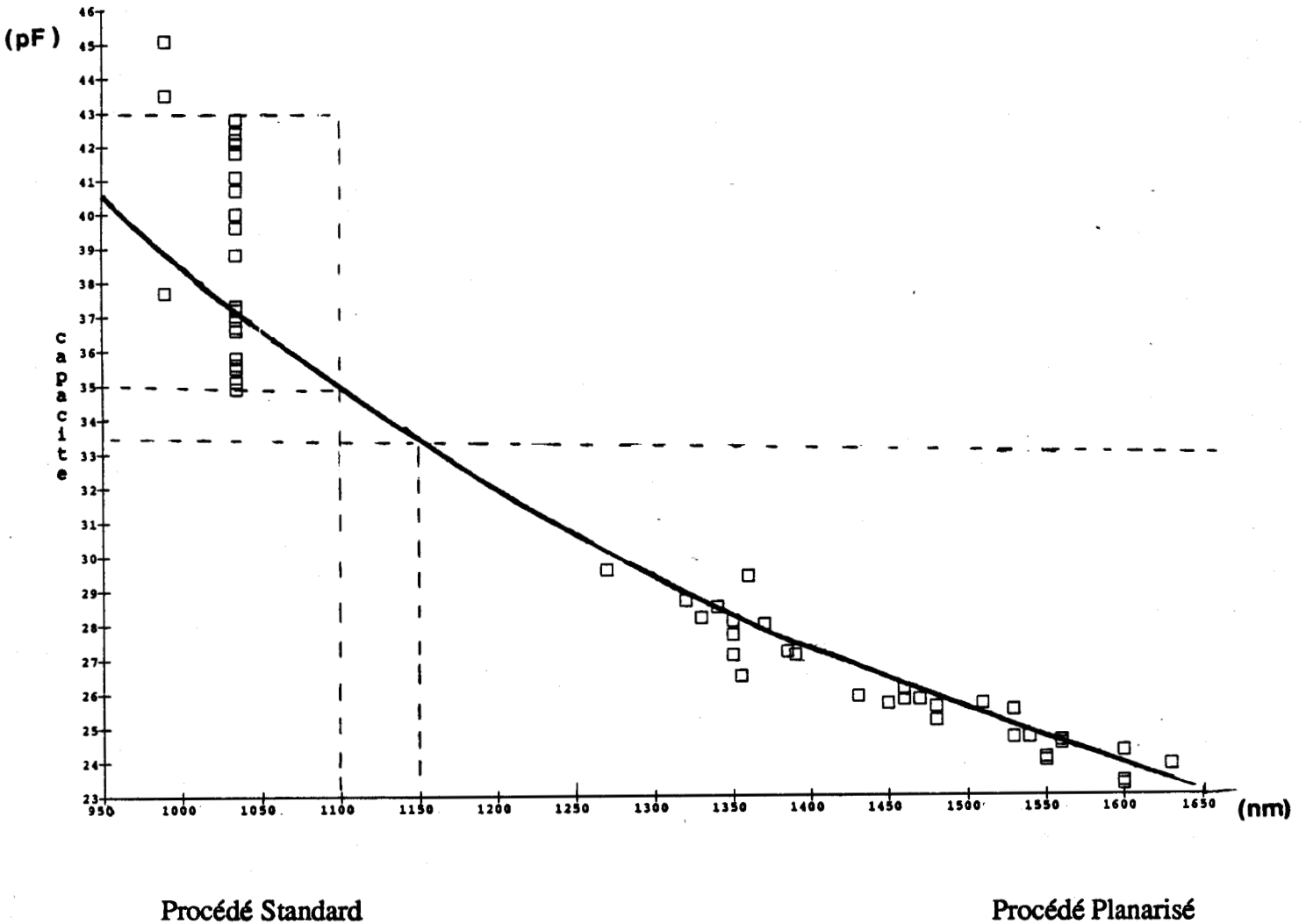


Figure 4-15 : Courbes de variation de la capacité en fonction de l'épaisseur d'oxyde

4.4.2 Tests d'électromigration

4.4.2.1 Description de l'électromigration

Des micro-conducteurs sont soumis à des densités de courant qui engendre une migration des atomes d'aluminium. Les endroits critiques, tels que les amincissements au passage de marche, sont alors révélés soit par appauvrissement soit par surabondance d'atomes d'aluminium, créant après un temps d'utilisation, respectivement des circuits ouverts ou des court-circuits. L'apparition du phénomène d'électromigration dépend à la fois de la constitution des couches métalliques et des contraintes apportées par leur environnement. Notre objectif est de comparer les résultats d'électromigration pour trois types d'oxyde isolant reposant entre les deux premiers niveaux d'interconnexions :

- Oxyde CVD ou Pyrox
- Oxyde PECVD
- Oxyde PECVD planarisé

Un circuit, dont la description est donné en annexe 4-4, permet l'étude de l'électromigration pour des conducteurs IN1 de largeurs 2.4µm, 4µm et 6µm. Ils sont recouverts de la couche d'oxyde choisie, d'un second niveau de métallisation et d'une couche de passivation de nitrure de silicium. Mise à part le type d'oxyde, toutes les plaques subissent le procédé classique rappelé en partie ci-dessous :

- 1er niveau de métal : TiW + AlSi(1%)Cu(2%) - 850nm
- Isolation : SiO₂ CVD, PECVD planarisé ou non planarisé
- 2nd niveau de métal : AlSi(1%)Cu(0,03%) - 1500nm
- Passivation : Si₃N₄ - 1500nm

Les cristaux découpés dans la plaque, sont montés dans un boîtier à quatre broches, puis placés dans une chaufferette à 200°C. Nous appliquons ensuite une densité de courant constante de $3,76 \cdot 10^6$ A/cm² à un des conducteurs, et nous relevons les durées de fonctionnement. Un système de surveillance indique si la défaillance a été provoquée par un circuit ouvert ou un court-circuit.

4.4.2.2 Résultats

Pour chaque type d'oxyde, dix pièces sont testés. La figure 4-16 montre les résultats obtenus. Tous les défauts constatés l'ont été par apparition de circuits ouverts.

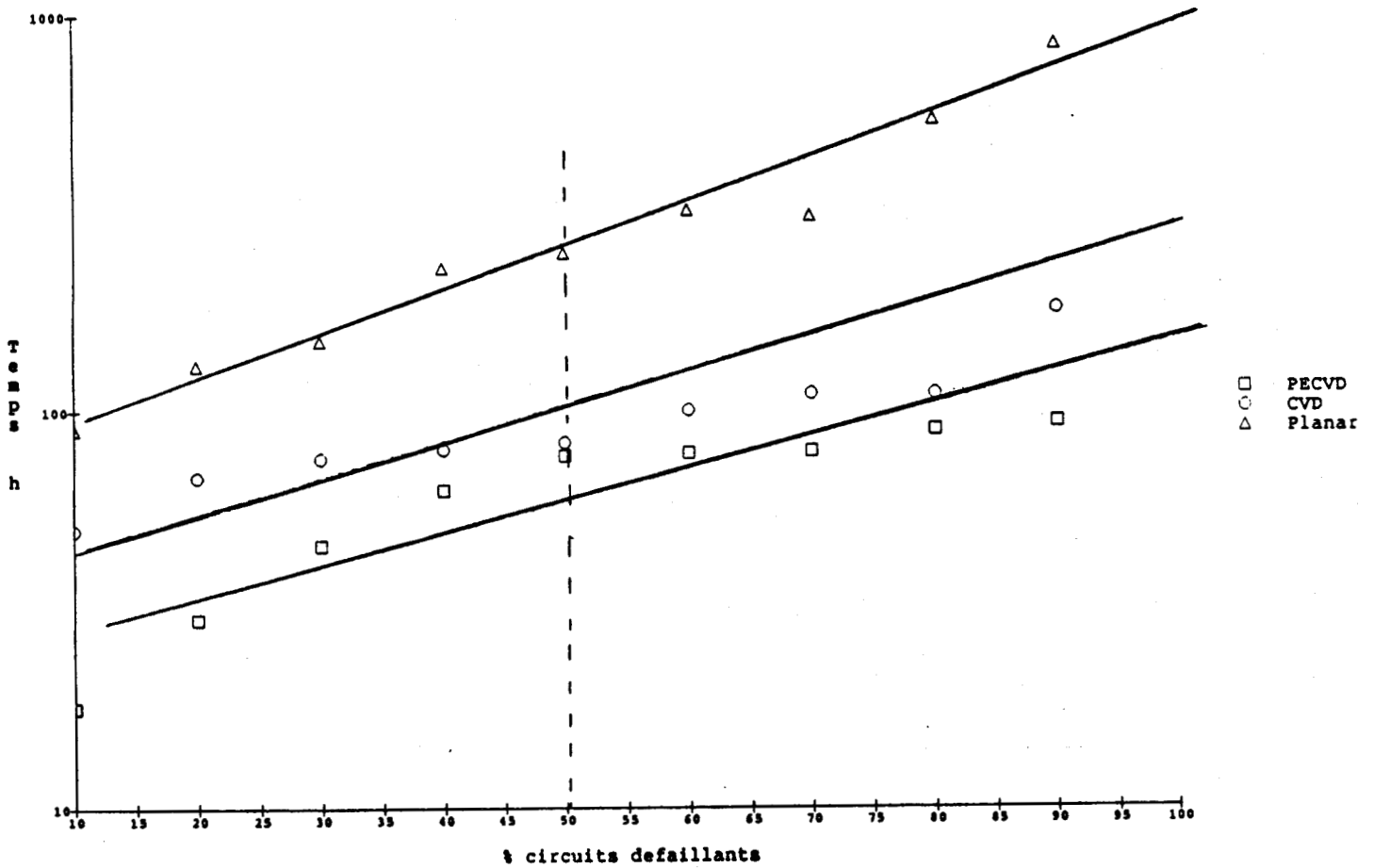


Figure 4-16 : Résultats d'électromigration pour différents oxydes

Le MTF (Mean Time before Failure) relevé à 50% des circuits défectueux est respectivement :

- Pour l'oxyde CVD : 90 heures
- Pour l'oxyde PECVD : 65 heures
- Pour l'oxyde PECVD planarisé : 250 heures

En planarisant l'oxyde plasma et en complétant l'isolation par un dépôt d'oxyde plasma de 500nm sur terrain plat, nous améliorons donc les résultats d'électromigration.

4.4.3 Rendement et Fiabilité

L'étape de planarisation est surtout introduite dans le procédé Subilo pour améliorer la qualité et la fiabilité des circuits. Après avoir vérifié la conformité des caractéristiques électriques des composants et des niveaux de métallisation, nous testons à présent le fonctionnement et la fiabilité de circuits réels planarisés.

4.4.3.1 Présentation des tests de fiabilité

Sur une plaque de silicium de cinq pouces de diamètre, deux milles circuits intégrés appelés "cristaux" sont juxtaposées. Tous ces cristaux sont mesurés par un contrôle sous pointes (CSP) à partir d'un programme de test spécifique au type de circuit. Un certain nombre de cristaux bons sont sélectionner pour être montés dans des boitiers et être testés en fiabilité. Trois types de contraintes thermiques sont appliqués au circuit :

a) "Operating Life Time" (O.L.T.)

Les circuits sont alimentés à leur tension Vcc et placés dans une étuve à 125°C. La température de jonction est alors de 150°C. La durée du test est classiquement de 168, 504, et 1000 heures.

b) "Température Cycling" (T.C.)

Les circuits non alimentés subissent des chocs thermiques. Ils sont placés dans une étuve à 150°C pendant 30min puis sont rapidement transférés dans une étuve à -65°C. Le nombre de cycles varie de 100, 200, 500 à 1000.

c) "Pressure Pot " (P.P.)

Les circuits sont placés dans une atmosphère chaude et avec un taux d'humidité de 100%. La durée d'application de la contrainte varie de 100, 200 à 300 heures.

4.4.3.2 Résultats de rendements et de tests de fiabilité

a) Rendement

L'étape de planarisation est appliquée dans un premier temps à quatre types de circuits Subilo :

- UMA 1010 et UMA 1012, des circuits synthétiseurs comportant deux niveaux d'interconnexions.
- TDA8708 et TDA8703 des convertisseurs analogiques digitales 8-bits, dont les circuits correspondants sont très denses et comportent trois niveaux d'interconnexions.

Cinq lots d'UMA 1010 et 1012 sont processés et séparés en deux après la réalisation de l'IN1, afin de réaliser l'étape de planarisation sur une des deux parties. Sept lots de TDA8708 sont entièrement planarisés. Sur cet ensemble de lots, nous calculons le rendement moyen d'une plaque, qui est défini par le rapport du nombre de cristaux (ou circuits) fonctionnels sur le nombre de cristaux (ou circuits) potentiels. Comme nous le montre le tableau de la figure 4-17, les rendements sont plus élevés sur les lots ou les parties de lot ayant subi l'étape de planarisation.

Type	Numéro lot	Partie Planar	Partie Classique
UMA1010	16009	70%	60%
UMA1010	16010	74%	71%
UMA1012	16025	85 %	60 %
UMA1012	16026	80 %	52 %
UMA1012	16027	70 %	45 %
TDA8708	Moyenne sur 7 lots	58 %	44%

Figure 4-17 : Rendements de lots Planarisée et Standard

b) Fiabilité

Des circuits planarisés TD8708 et TDA8703 sont découpés et montés dans des boîtiers plastiques "SOT" pour être testés en fiabilité. Le fonctionnement des circuits est contrôlé avant et après chaque période de tests et les résultats sont rassemblés dans le tableau en annexe 4-5. Tous les circuits ayant subi les tests de fiabilité n'ont indiqué aucune défaillance. Nous garantissons donc, avec le procédé Subilo planarisé, la fiabilité des circuits.

4.4.4 Conclusion

Avec l'introduction de l'étape de planarisation, nous observons une légère diminution des résistances des conducteurs IN2 et une augmentation des résistances de contacts entre les conducteurs IN1 et IN2. Mais, toutes les valeurs des paramètres électriques de contrôle restent dans les normes. D'ailleurs, pour quatre types de circuits réalisés avec le procédé Subilo planarisé, le rendement a augmenté d'en moyenne 17% par rapport au procédé classique. Nous avons également prouvé la fiabilité de ces circuits planarisés. Par conséquent, l'étape de planarisation intégrée au procédé Subilo améliore la qualité des circuits sans en modifier les performances électriques. Il est cependant déconseillé de planariser des circuits utilisant des capacités mettant en jeu l'épaisseur de la couche de diélectrique planarisée.

Conclusion

Le Subilo est un procédé bipolaire à isolement par oxyde. Ce type d'isolement engendre des têtes d'oiseau qui perturbent la topographie des niveaux de métallisation. En effet, sur des topologies dites "critiques", il y a risques de coupure des second ou troisième niveau d'interconnexions. Pour augmenter la qualité et la fiabilité des circuits sans en modifier la topologie, nous avons introduit, dans le procédé Subilo, une étape de planarisation par Resist Etch Back. Elle est appliquée au diélectrique situé entre le premier et le second niveau de métallisation. Le but est d'aplanir les marches créés par les têtes d'oiseau et par les motifs du premier niveau de métallisation (IN1).

La planarisation par REB comporte deux étapes :

1ère Etape : Un procédé de fluage utilisant la photorésine positive HPR204. Après le pelliculage, la résine est exposée et recuite dans une étuve à 200°C pendant 30min. Celle-ci planarise alors parfaitement la surface quelque soit la topographie. Mais, son épaisseur varie suivant la topologie.

Une caractérisation complète des épaisseurs de diélectrique en fonction de la taille et de la densité des interconnexions est donnée par un plan d'expérience.

2ème Etape : Un procédé de gravure sèche, appelé "etch-back" mis au point dans un réacteur de type RGV avec les gaz C_2F_6 , CHF_3 , O_2 , et He.

Une modélisation de l'influence de la puissance R.F., des flux de CHF_3 , C_2F_6 et O_2 sur les vitesses et uniformités de gravure est réalisée à travers un plan d'expérience. Celui-ci nous a permis d'ajuster efficacement le procédé d'etch-back en tenant compte de l'effet de charge.

Enfin pour augmenter la reproductibilité des résultats de la planarisation dans le temps et suivant la densité des circuits, nous avons introduit dans le procédé d'etch-back :

- Une détection par spectrométrie optique de fin d'attaque (DFA).
- Des temps d'overetch variables pour compenser les variations de vitesse de gravure de l'oxyde entre deux changements d'électrodes.

L'étape de planarisation ainsi définie est appliquée au procédé Subilo. Les résultats sont les suivants :

- La hauteur de marche finale, paramètre caractéristique de la qualité de la planarisation, est pour une valeur initiale de 850nm, toujours inférieure à 300nm. Ce paramètre est très reproductible.
- Le risque de coupure du second niveau de métallisation liée à une mauvaise couverture de marche n'existe plus.
- L'étape de planarisation ne modifie pas les performances électriques du procédé Subilo classique.
- Le rendement des plaques réelles est augmenté de près de 17% pour certains types de produits (rapport cristaux bons/cristaux potentiels).

De façon générale, avec la création du procédé Subilo planarisé, nous augmentons la qualité et la fiabilité des circuits intégrés.

Cependant dans le procédé Subilo planarisé, les épaisseurs de diélectrique varient de façon plus importante que dans le procédé classique. Les épaisseurs sont comprises entre 500nm et 1750nm, toutes dispersions confondues au lieu de 1000nm +/- 10%. Mais, nous avons vérifié que ces épaisseurs sont compatibles avec le reste du procédé Subilo et qu'elles ne modifient pas les performances électriques des circuits. Nous en avons conclu que tout circuit Subilo peut être planarisé à la condition qu'il n'utilise pas de capacités entre les deux premiers niveaux de métallisation.

Ce procédé de planarisation est actuellement industrialisé.

L'étape de planarisation apporte également d'autres avantages :

- N'ayant plus de problèmes de couverture de marche, l'épaisseur d'aluminium du second niveau de métallisation pourra être diminuée.
- Les étapes de photos réalisées sur une topographie plane auront une meilleure définition.
- Le diélectrique ne présentant plus d'angle rentrant, une gravure sèche possible du second niveau de métallisation est désormais possible.

Ainsi par l'introduction de l'étape de planarisation, nous pouvons envisager la densification du procédé Subilo.

Références bibliographiques : Chapitre 1

- 1 J.S. Kilby, "Invention of the integrated circuits",
IEEE Trans. Electron Devices, ED-23, p 648, 1976.
- 2 Peter B. Jonhson, Prochy Sethna
"Using BPSG as an Interlayer Dielectric".
Semiconductor international, pp 80 - 84, Oct 87.
- 3 K. Nassau, R. A. Levy, D. L. Chadwick
"Modified Phosphosilicate Glasses for VLSI Application".
Solid-State Science and technology, pp 409 - 415, Feb 85.
- 4 M. Yoshimaru and E. Takahasi
"CVD Dielectric Films for ULSI Planarization".
- 5 A. Schiltz
"Advantages of using Spin-On-Glass Layer in Interconnection Dielectric
Planarization". Microelectronic Engineering, pp 413 - 421, 86.
- 6 Satish K. Gupta
"Spin-On-Glass for Dielectric Planarization"
Microelectronic Manufacturing and Testing, pp 10 - 12, April 89.
- 7 W. Heesters
"The use of SOG for INS-Planarization in C1X3T"
Internal report - Philips Research Laboratories Eindhoven
- WJR - M89/15-023.
- 8 W. Heesters, M. Nieuwesteeg, R. Vissher
"The Feasibility of Siloxane Based SOG sandwich for INS-Planarization
in C1X3T". Internal report - Philips Research Laboratories Eindhoven-
WJR - 8416-90022.
- 9 C.Y. Ting
"Study of planarized sputter deposited SiO₂"*
J. Vac. Sci. Tech, pp 1105, 79
- 10 Y. Hazuki, T. Moriya
"A Damage-Free Perfect Planarization Method Using Bias-Sputtering
SiO₂". IEEE Transactions on Electron Devices, pp 628 - 632, March 87.
- 11 S. Fujii, M. Fukumoto, G. Fuse and T. Ohzone
"A Planarization Technology Using a Bias-Deposited Dielectric Film
and an Etch-Back Process"
IEEE Transactions on Electron Devices, pp 1829 - 1833, Nov 88.
- 12 K. Machida, H. Oikawa
"A High Aspect Ratio and High Throughput SiO₂ Planarization
Technology with Bias-ECR Plasma Deposition".

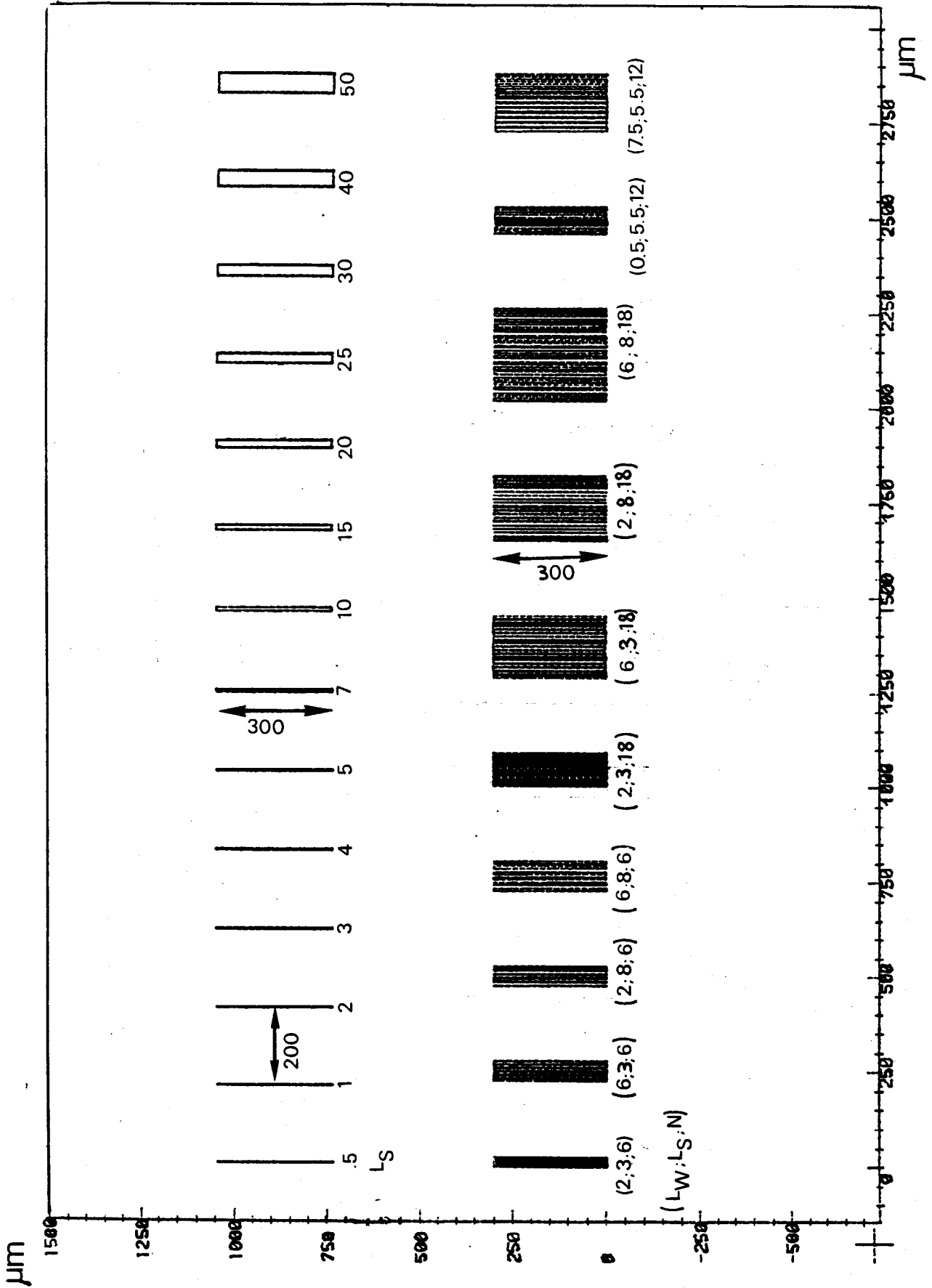
- 13 H. Kotani, H. Yakushiji, H. Harada, K. Tsukamoto and T. Nishioka
"Sputter-Etching Planarization for Multilevel Metallization"
Solid-State Science and technology, pp 645 - 648, March 83.
- 14 A.C. Adams, C.D. Capio
"Planarization of Phosphorus-Doped Silicon Dioxide"
Solid-State Science and Technology, pp 423- 429, Feb 81.
- 15 L.F. Johnson, K.A. Ingersoll, J.V. Dalton
"Planarizing of Phosphosilicate Glass Films on Patterned Silicon Wafers"
J. Vac. Sci. Technol.,pp 487-489, June 83.
- 16 H. Okabayashi
"Multilevel Metallization Technology for VLSIS"
- 17 E. Figueras, S. Hazebrouck, F. Van de Wiele
"An analysis of the advantages of a BOX isolation technique"
IEDM88.
- 18 G. Fuse and al.
"A practical trench isolation technology with a novel planarization process"
IEDM 87, pp 732-735.
- 19 L. de Bruin and J.M.F.G. Van Laarhoven
"Advanced multiple-step resist etchback planarization"
V-MIC, IEEE June 88, pp 404-410.
- 20 D. Barton, C. Maze, HP Co.
"A two level metal CMOS process for VLSI Circuits"
Semiconductor International, pp 98-102, Jan. 85

Références bibliographiques : Chapitre 2

- 1 Fred Van Roosmalen
"Topography effects in resist Etch-Back Planarization"
Philips Research Labs Eindhoven - Internal Report - Thin Film Mars 87
- 2 R. H. Wilson, P.A. Piacente
"Effect of Circuit Structure on Planarization Resist Thickness"
Solid-State Science and Technology, pp 981-984, May 86.
- 3 P.C. Sukanek - J. Imaging Technol., pp 184, 85
- 4 P.C. Sukanek
"A Model for Spin Coating with Topography"
J. Electrochem. Soc.,pp 3019-3026, Oct 89.

- 5 L.E. Stillwagon, R. G. Larson, G. N. Taylor
"Planarization of Substrate Topography by Spin Coating"
Solid-State Science and Technology, pp 2030-2037, August 87.
- 6 Frank M. White
"Viscous Fluid Flow"
Editeur Mac Grow Hill
- 7 B. Baccus, D. Collard, E. Dubois, D. Morel
"Efficient two-dimensional multilayer process simulation of advanced bipolar devices" (using a process simulator : IMPACT4)
Solid-State Science and Technology, pp 1013-1023, Nov 89.
- 8 B. Baccus
"Simulation bidimensionnelle de technologies silicium"
Thèse soutenue en Mars 90 à l'Université des Sci. et Tech. de Lille.
- 9 L.K. White, N. Miskowski
"Topography-induced thickness variation anomalies for spin-coated, thin films" - J. Vac. Sci. Technol., pp 862-868, May/June 85.
- 10 L.K. White
"Approximating Spun-On, Thin Film Planarization Properties on Complex Topographie" - Solid-State Science and Technology, pp 169-172, Jan 85.
- 11 L.K. White
"A Modeling Study of Superficial Topography for Improved Lithography"
Solid-State Science and Technology, pp 3037-3041, Dec 85.
- 12 A. Schiltz, M. Pons
"Two-Layer Planarization Process"
Solid-State Science and Technology, pp 178-181, Jan 86.
- 13 S. Crapella, F. Gualandris
"Planarizaion by Two-Resist level"
Solid-State Science and Technology, pp 683-685, March 88.
- 14 G. Fuse, H. Ogawa, K. Takeiwa, I. Nakao, S. Odanaka, M. Fukumoto, H. Iwasaki, T. Ohkone
"A Pratical Trench Isolation Technology with a Novel Planarization Process". IEDM, pp 732-734, 87
- 15 L.K. White
"Planarization Properties of Resist and Polyimide Coatings"
Solid-State Science and Technology, pp 1543-1548, July 83.
- 16 A. Schiltz, P. Abraham, E. Dechenaux
"Improvement of Photoresist Planarization Properties by thermal Cure"
Solid-State Science and Technology, pp 190-194, Jan 87.

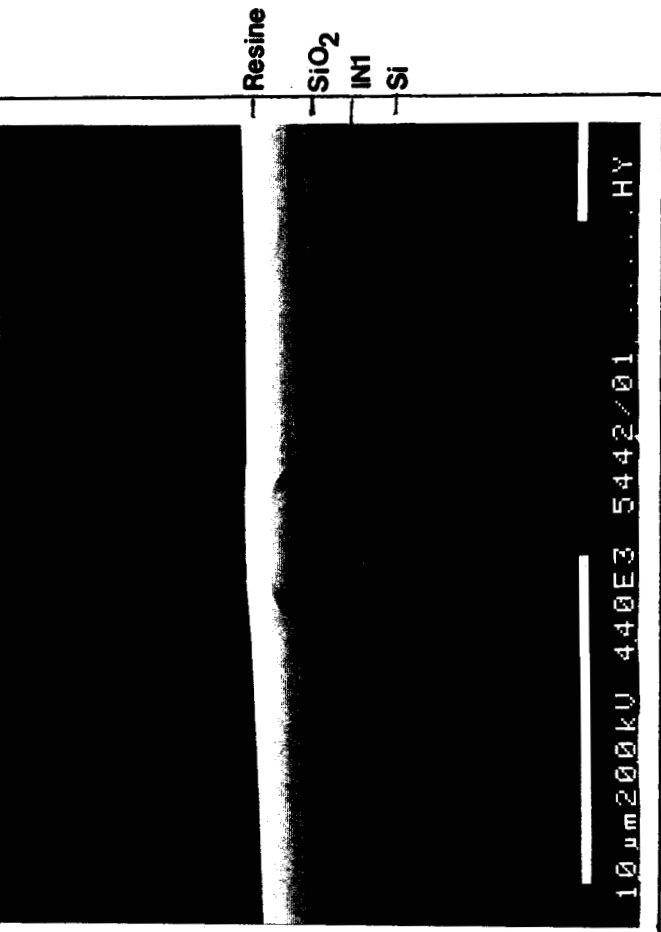
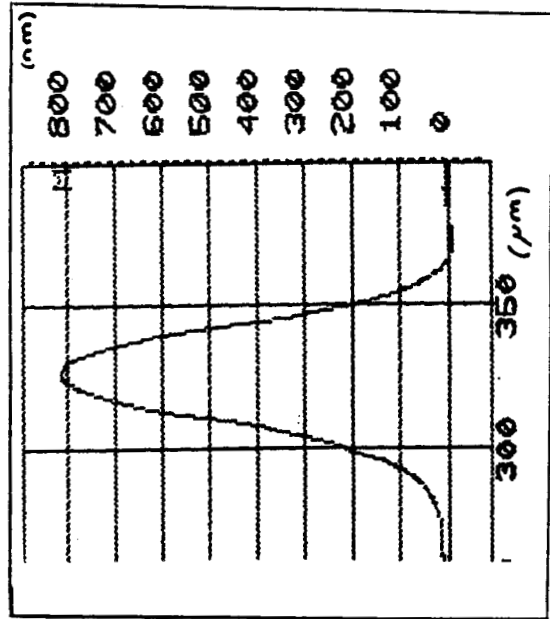
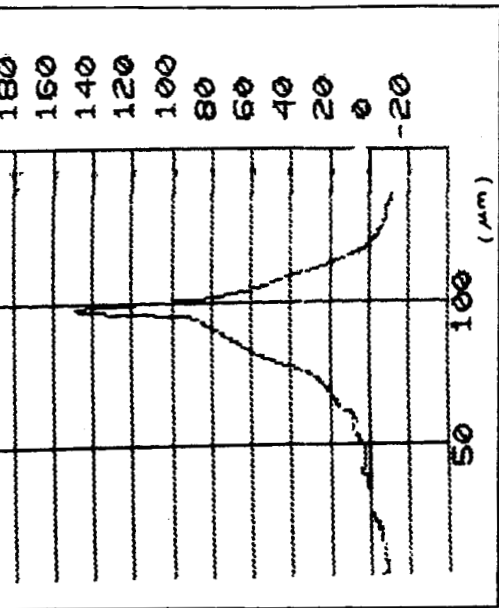
Annexe 2-1 : Description du Masque "PLANAR"



Annexe 2-2 : Planarisation de bandes isolées par la résine HPR204

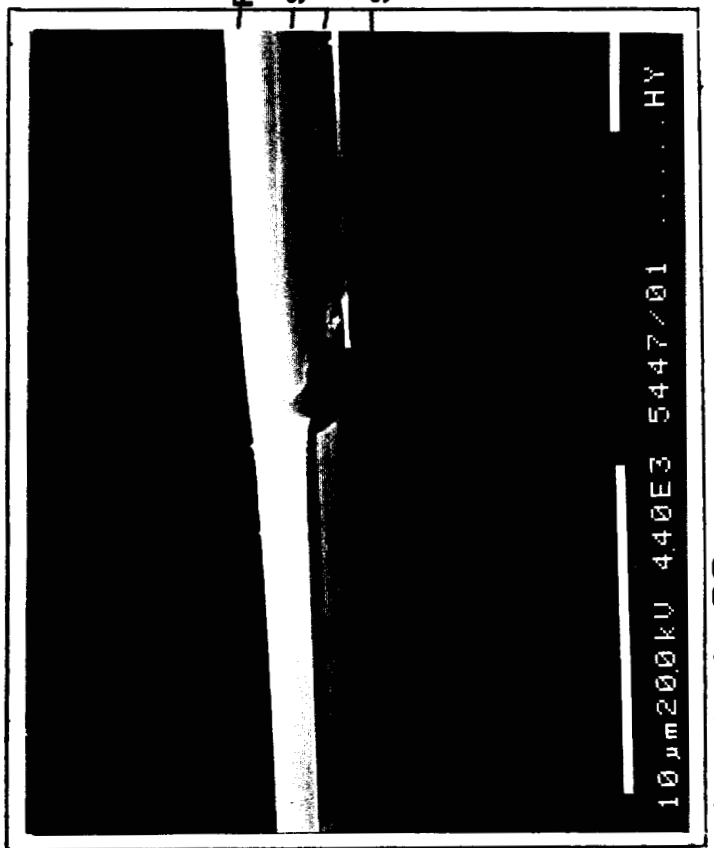
a) COUPES MEB

b) COURBES PROFILOMETRIQUES



a)

bande de 2µm

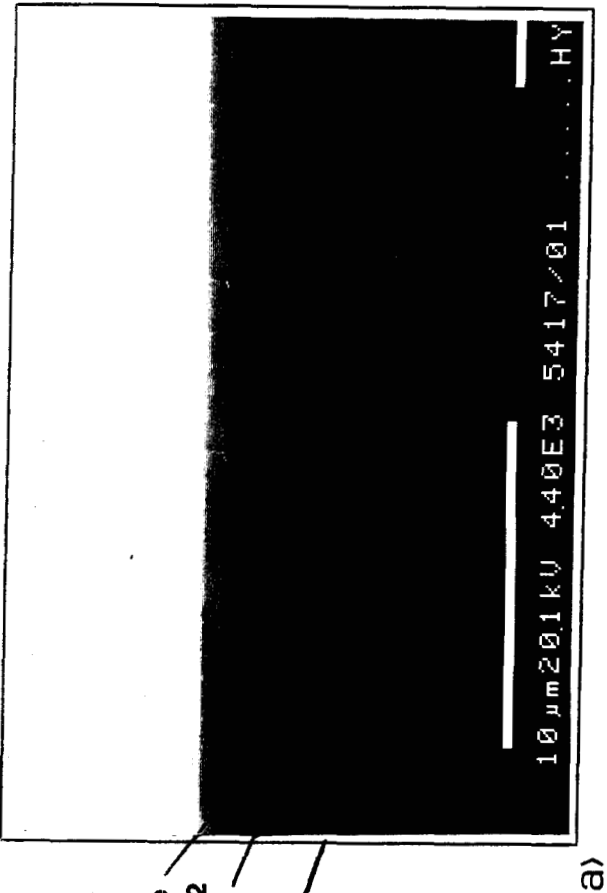


a)

bande de 30µm

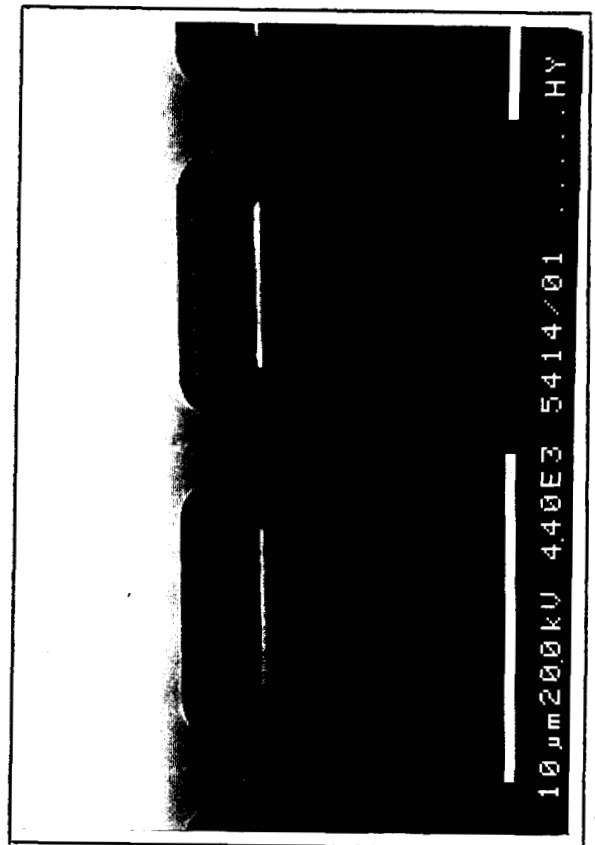
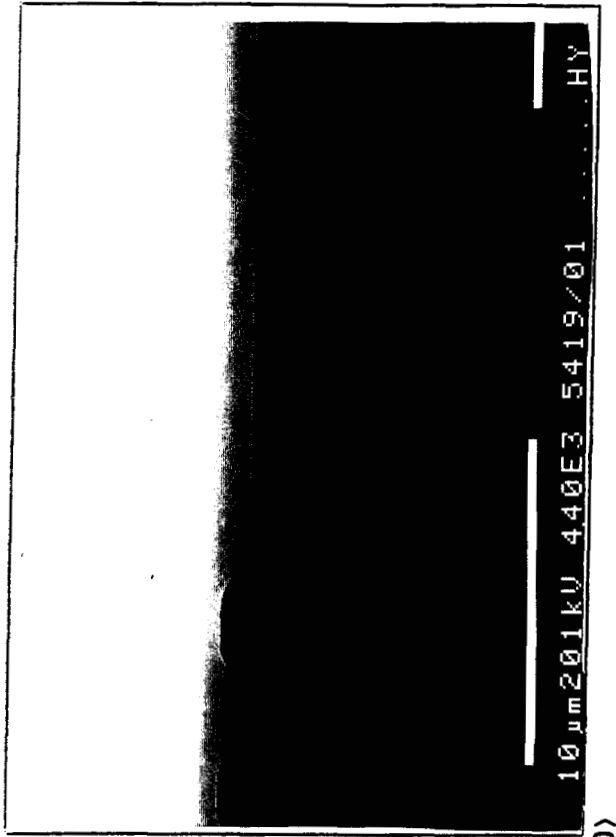
Annexe 2-3 : Planarisation de réseaux par la résine HPR204

Resine
SiO₂
IN1
Si

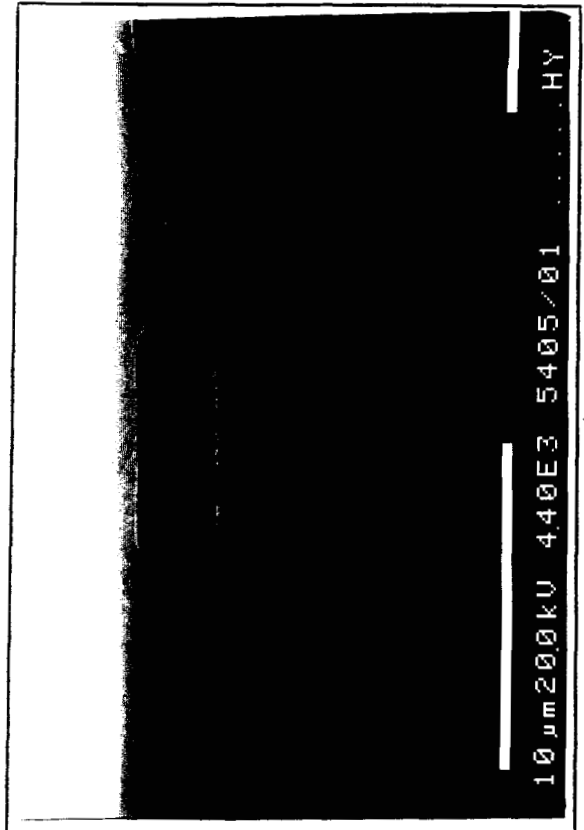


réseau : $L_w = 2 \mu m$; $L_s = 3 \mu m$; $N = 18$

a) CENTRE
b) BORD



réseau : $L_w = 6 \mu m$; $L_s = 3 \mu m$; $N = 18$



réseau : $L_w = 6 \mu m$; $L_s = 3 \mu m$; $N = 18$

Annexe 3-1 : Présentation de l'équipement de gravure

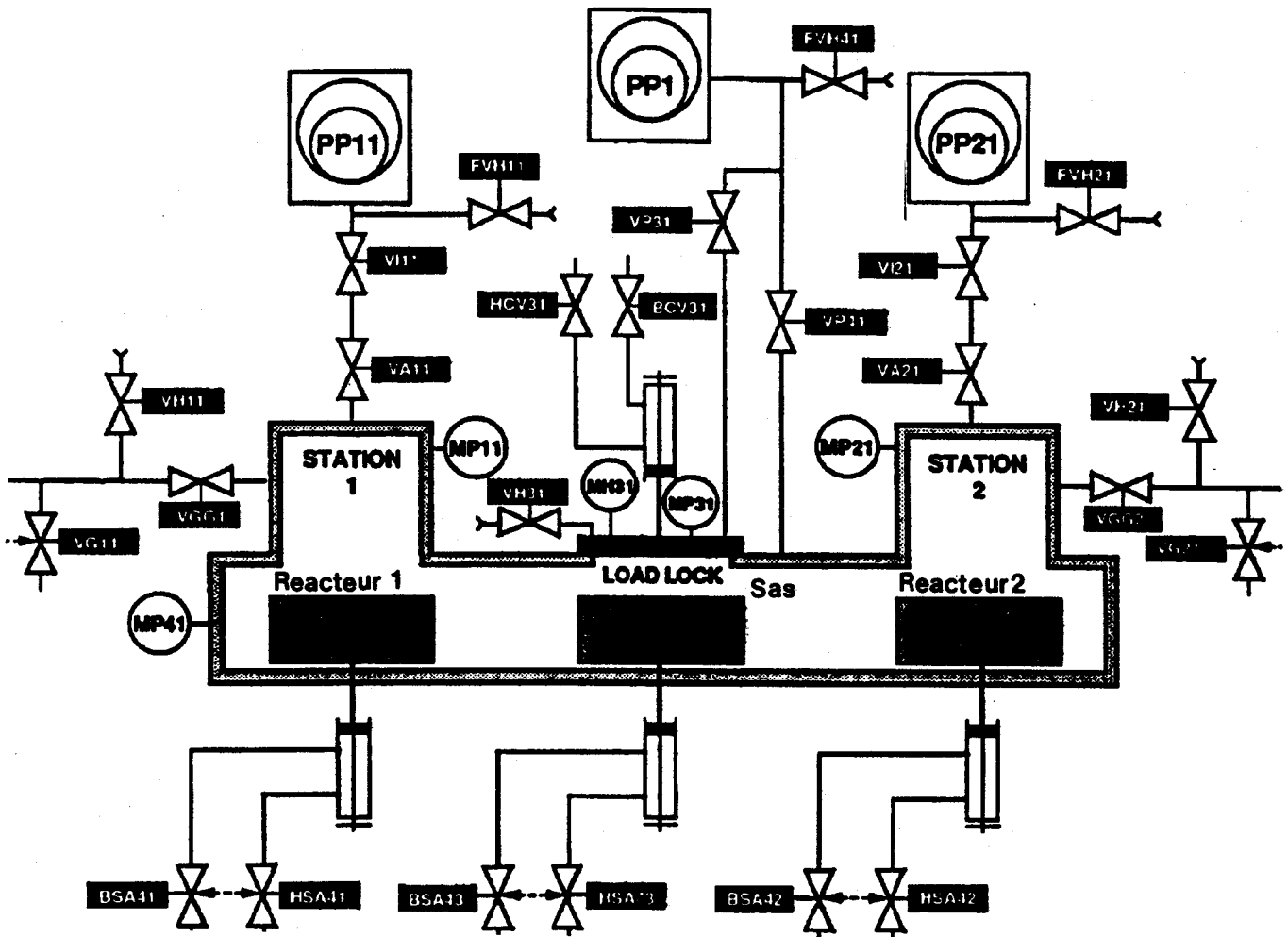


Figure a : Présentation de la GIR 262 (Alcatal)

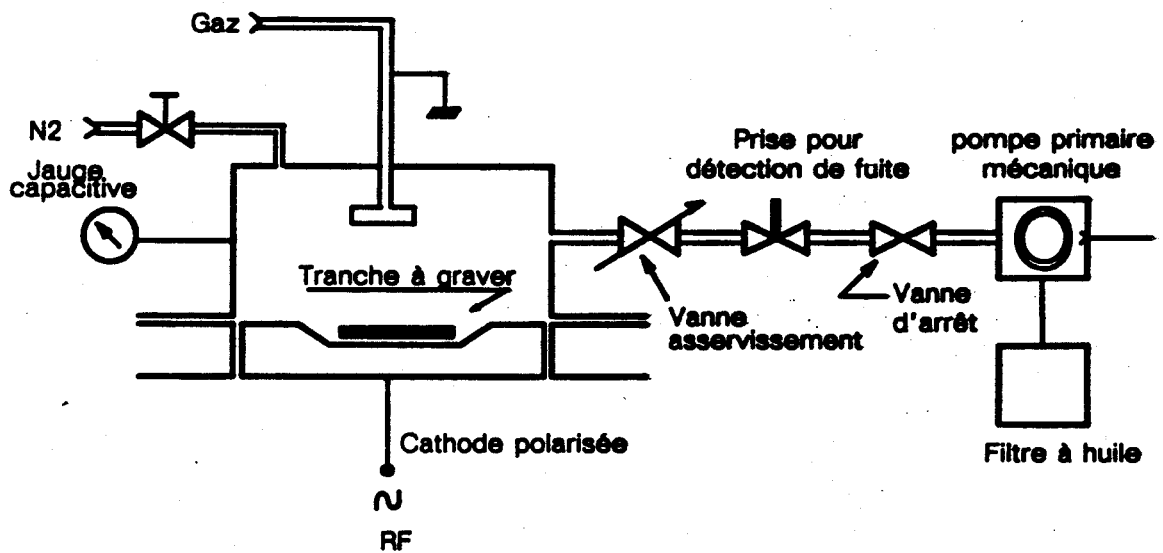
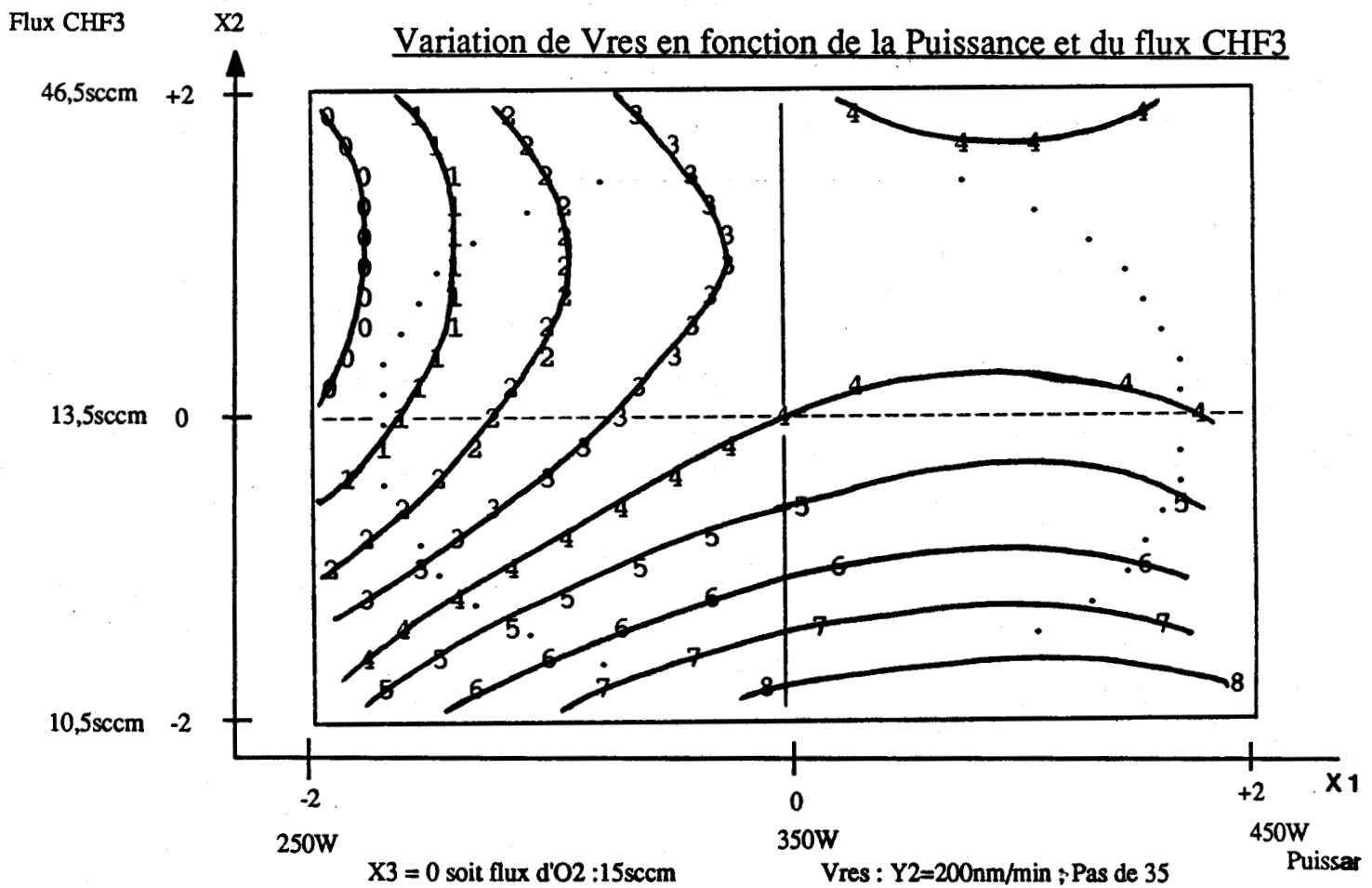
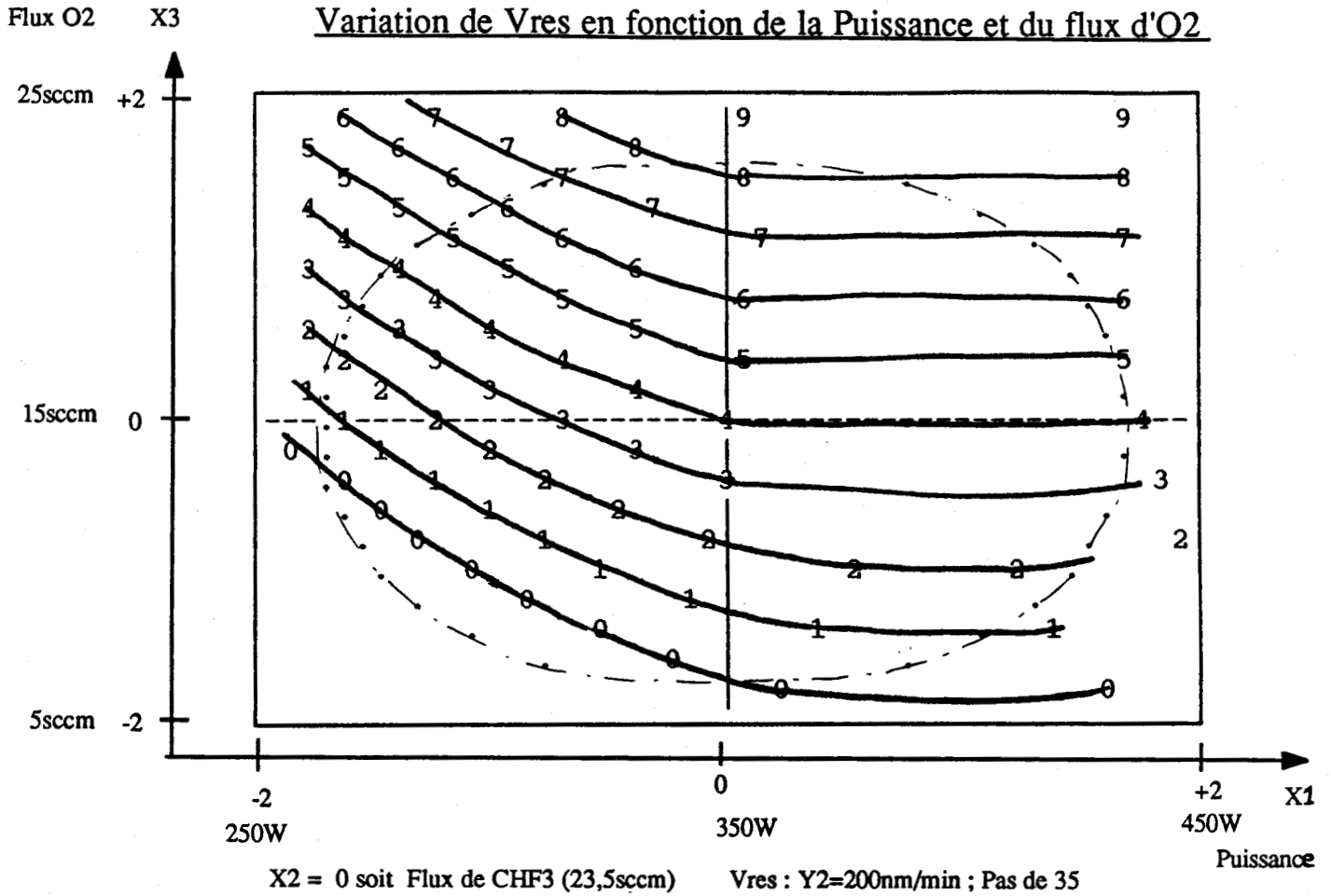


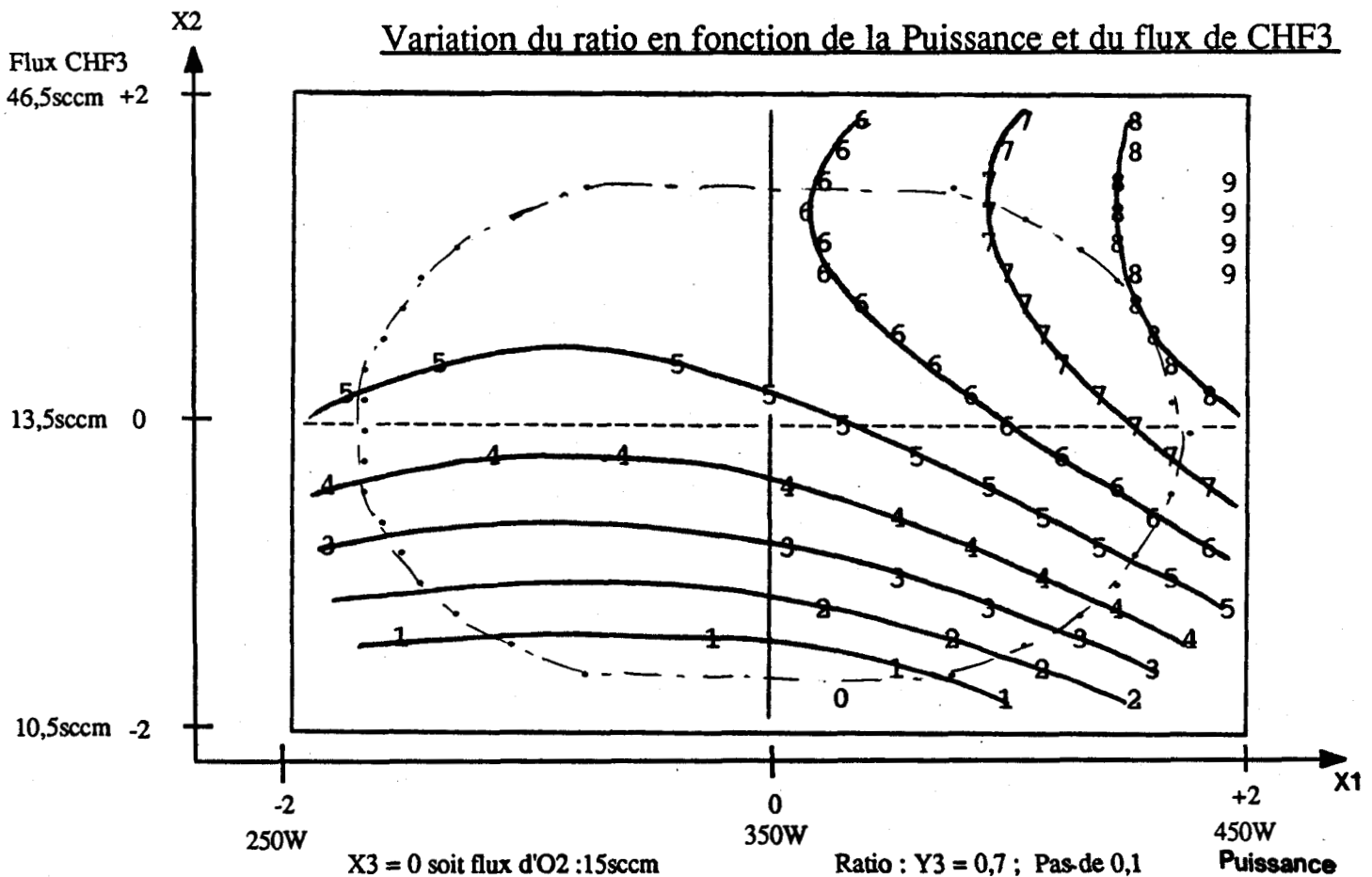
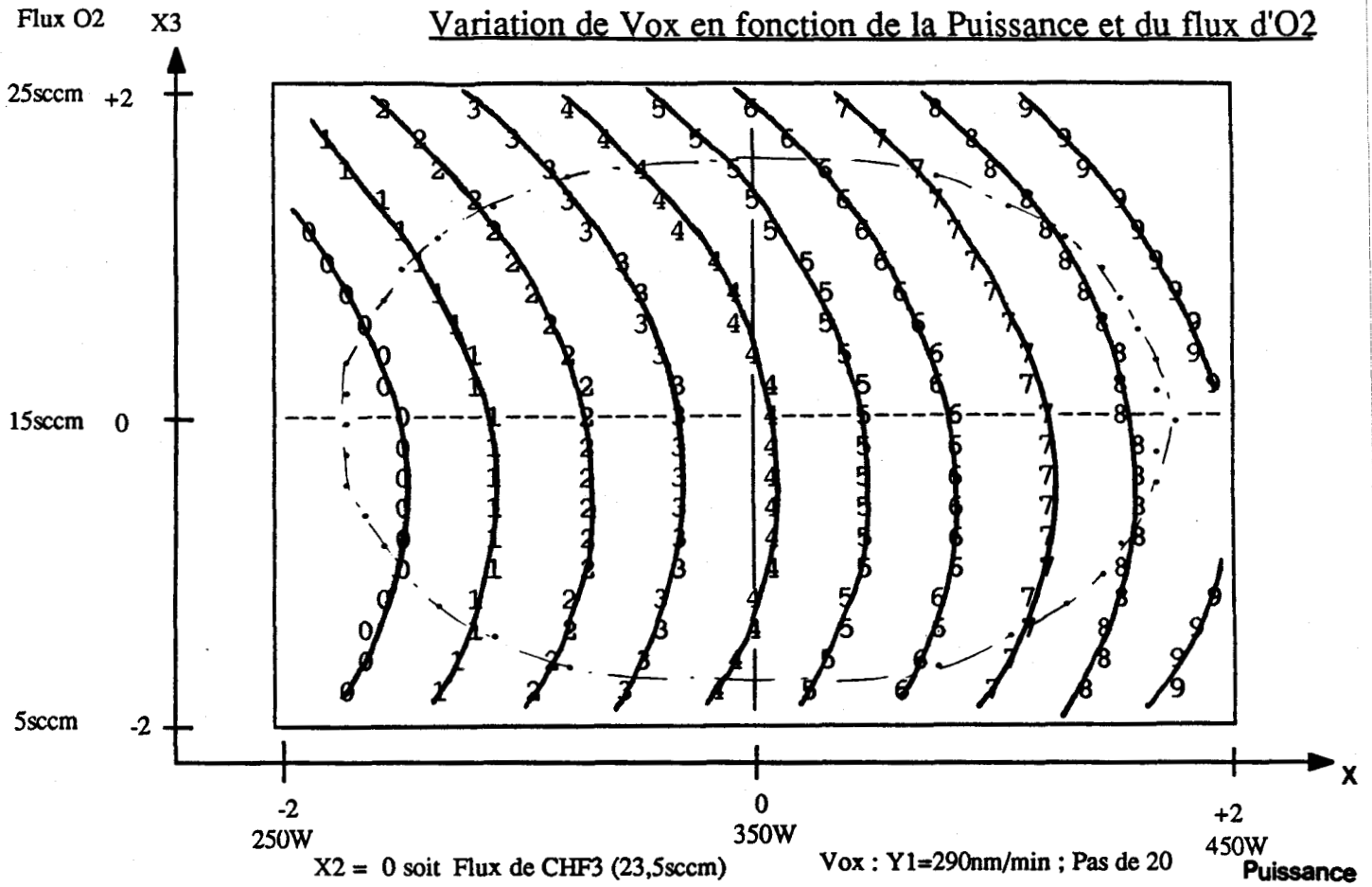
Figure b : Présentation du réacteur de type RGV

Annexe 3-2 (1ere Partie) : Graphes d'isovaleurs - Vres -

Variation de Vres en fonction de la Puissance et du flux d'O2



Annexe 3-2 (2eme Partie) : Graphes d'isovaleurs - Vox et R -



Annexe 4-1 : Résultats du procédé de fluage sur des circuits réels

Épaisseurs de Résine sur l'oxyde PECVD

PHOTO 1

sur tête d'oiseau :
700nm
sur oxyde d'isolation
1000nm

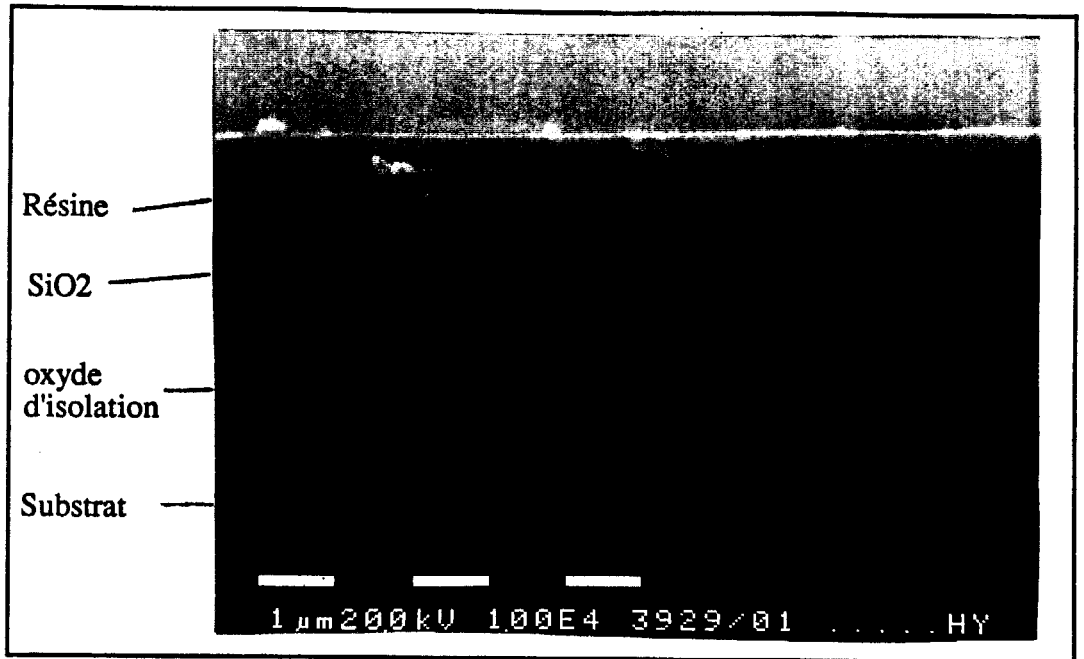


PHOTO 2

sur IN1 (Ls = 1,5μm)
500nm
sur oxyde d'isolation :
1350nm

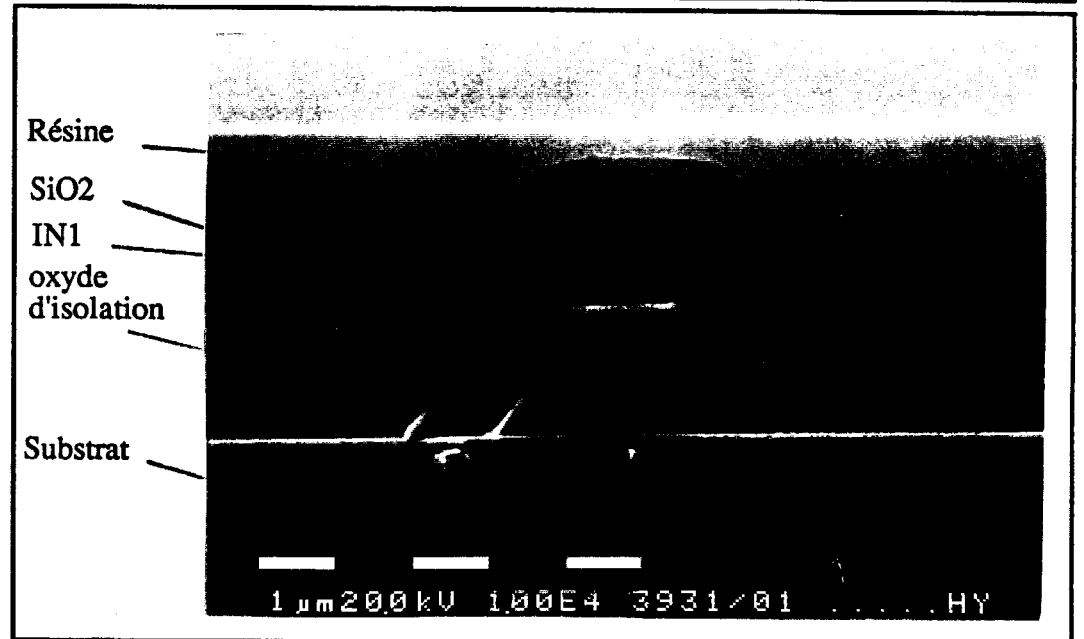
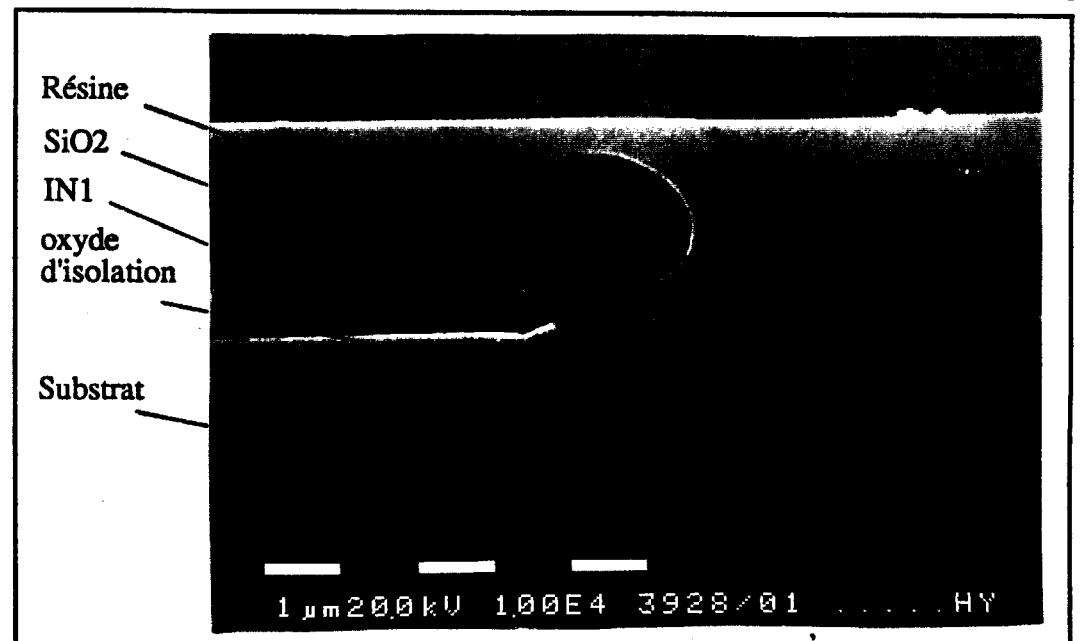


PHOTO 3

sur IN1 (Ls >6μm) :
900nm
sur IN1 + tête d'oiseau
450nm
sur l'oxyde d'isolation
1450nm
dans le creux IN1 + OD
2000nm



* Révélation des différentes couches par gravure partielle de l'oxyde

Annexe 4-1 (suite et fin)

Épaisseurs de Résine
sur l'oxyde PECVD

PHOTO 4

Réseau
($L_s=2,5\mu\text{m}$; $L_w=4,5\mu\text{m}$)

sur IN1 : 750nm

sur oxyde d'isolation
1450nm

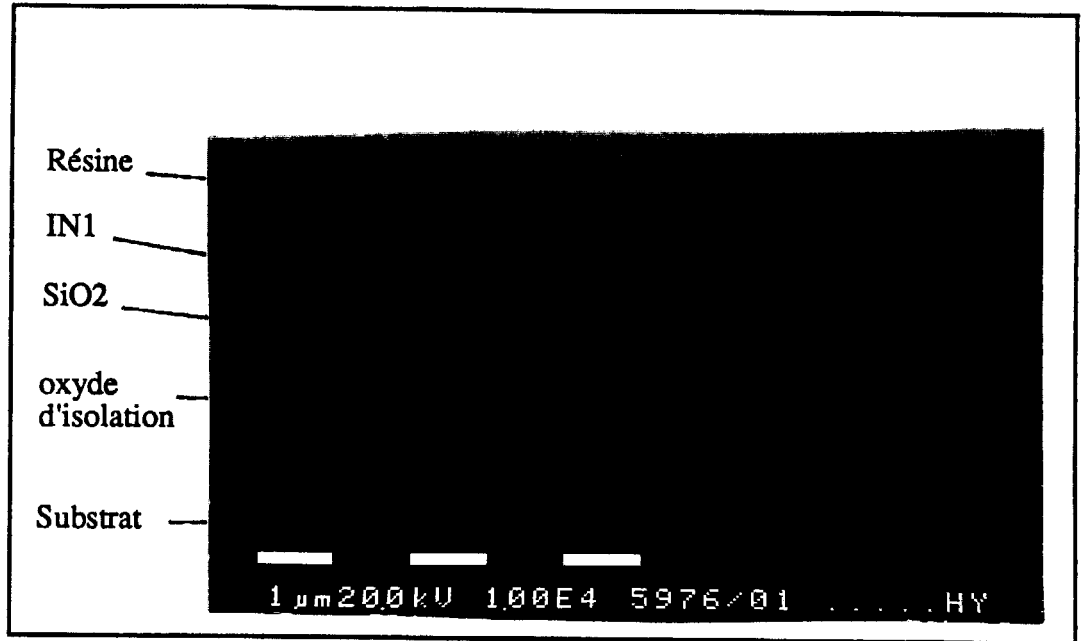


PHOTO 5 : Montage

Épaisseur minimale sur IN1 + OD : 4000nm

Épaisseur maximale dans le creux IN1 +OD : 1800nm



Annexe 4-2 : Résultats du procédé d'etch-back sur des circuits réels

Epaisseurs d'oxyde sur conducteurs IN1 et
Hauteur de marche

PHOTO 1

Hauteur de marche : 0nm

Epaisseur d'oxyde sur OD
300nm

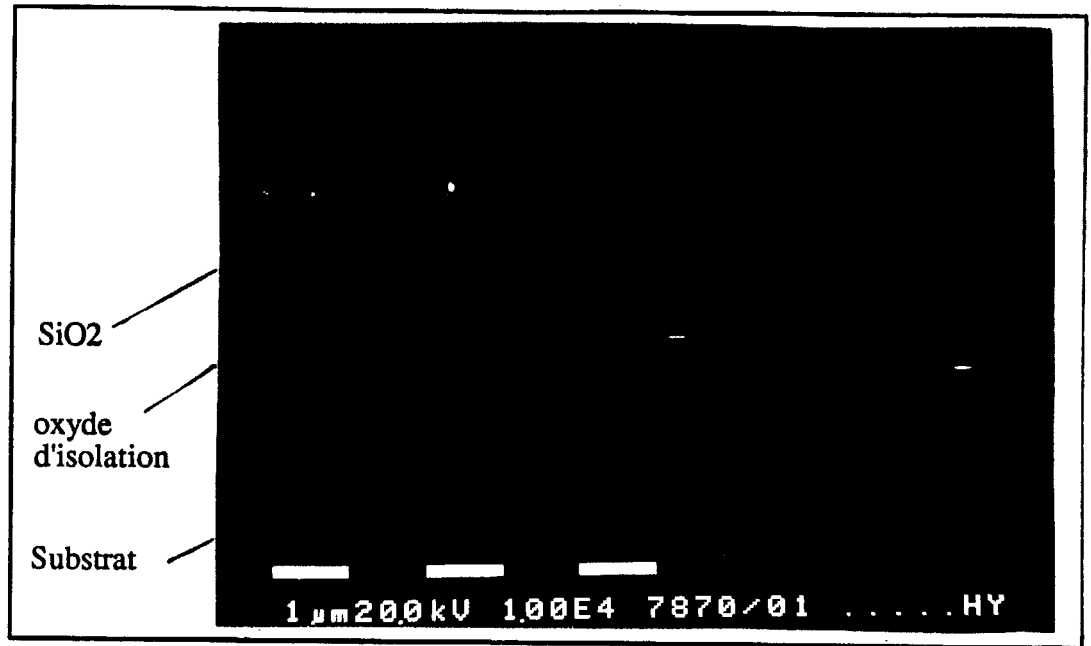


PHOTO 2

Hauteur de marche : 0nm

Epaisseur d'oxyde sur IN1:300nm

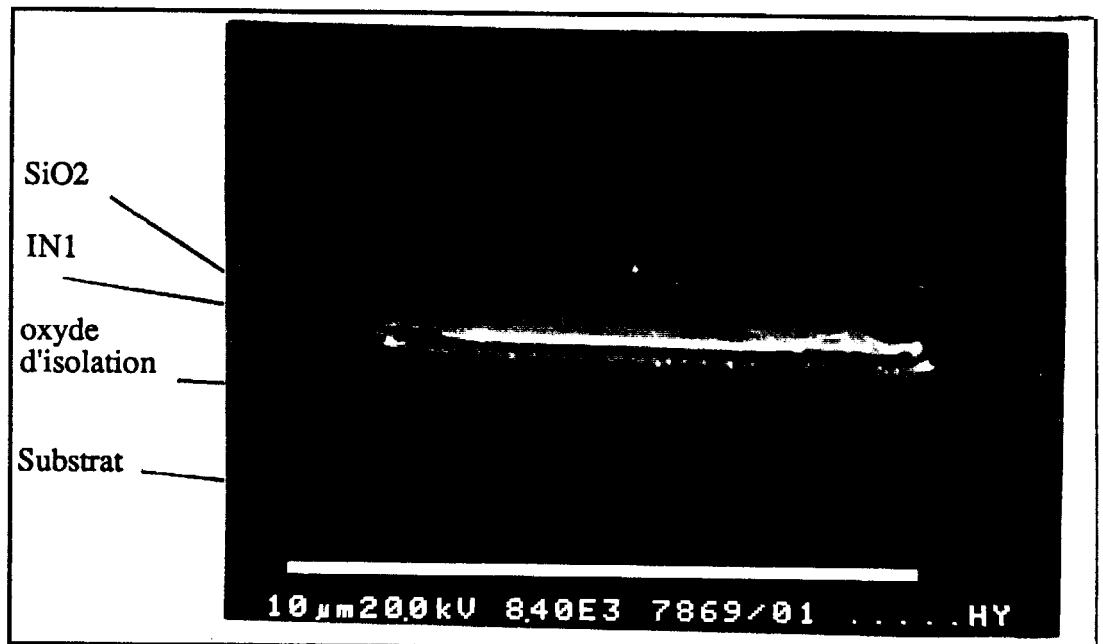
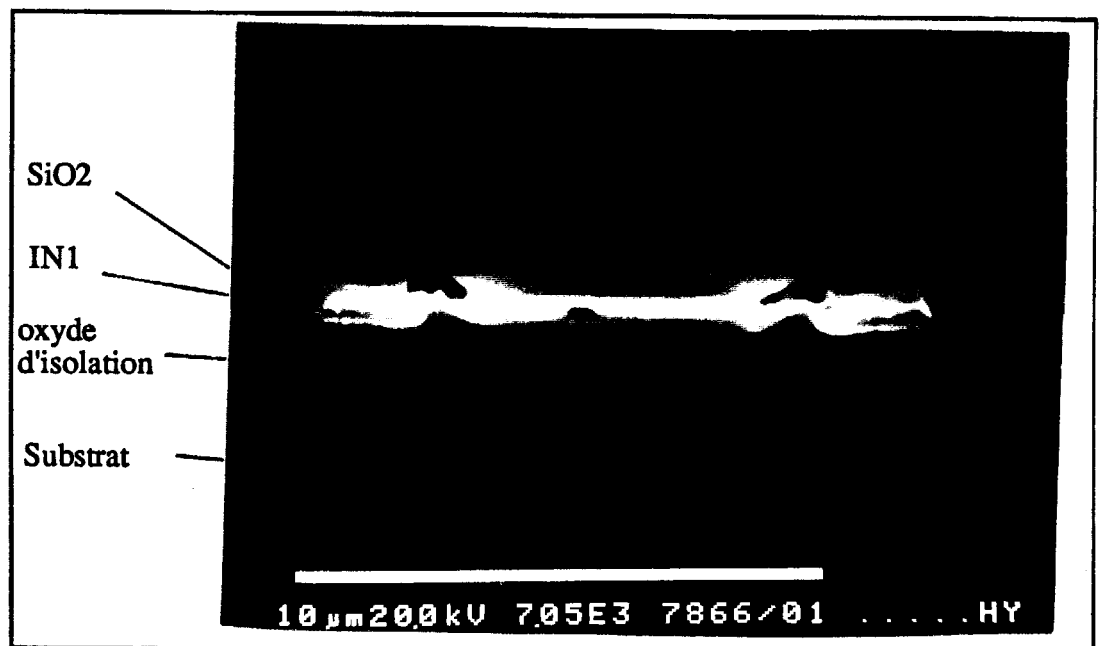


PHOTO 3

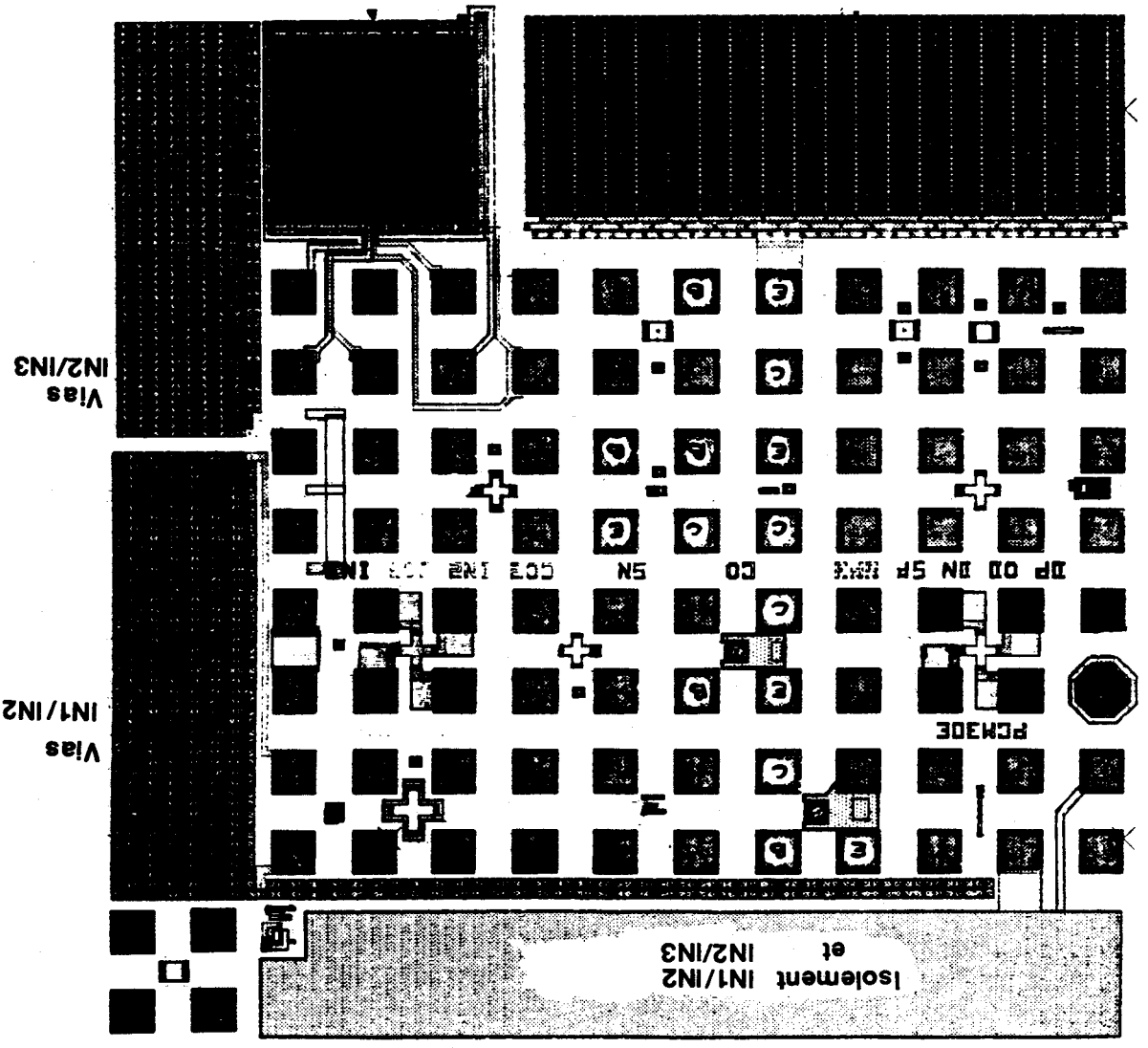
Hauteur de marche
100nm max

Epaisseur d'oxyde sur IN1 + OD : 0nm

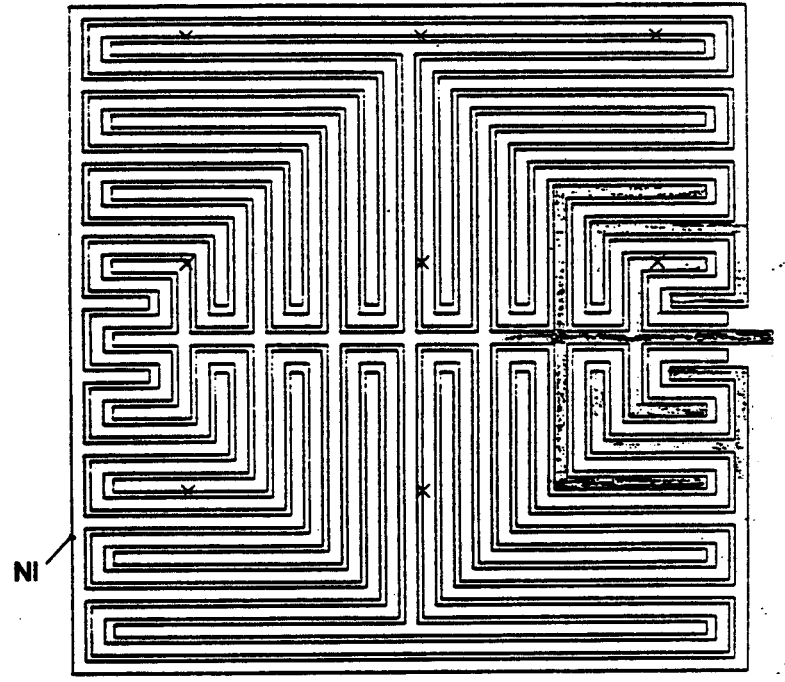
Epaisseur d'oxyde sur IN1 : 300nm



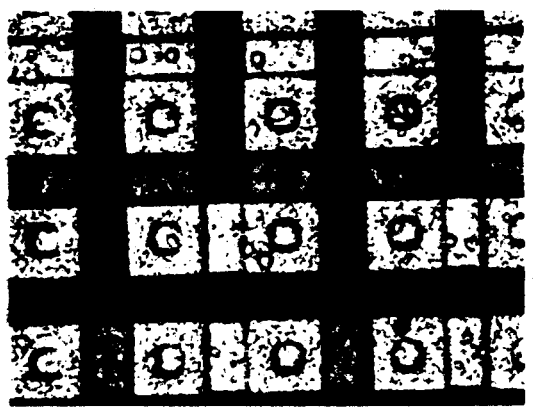
* Révélation des différentes couches par gravure partielle de l'Aluminium



a) Présentation générale du PCM

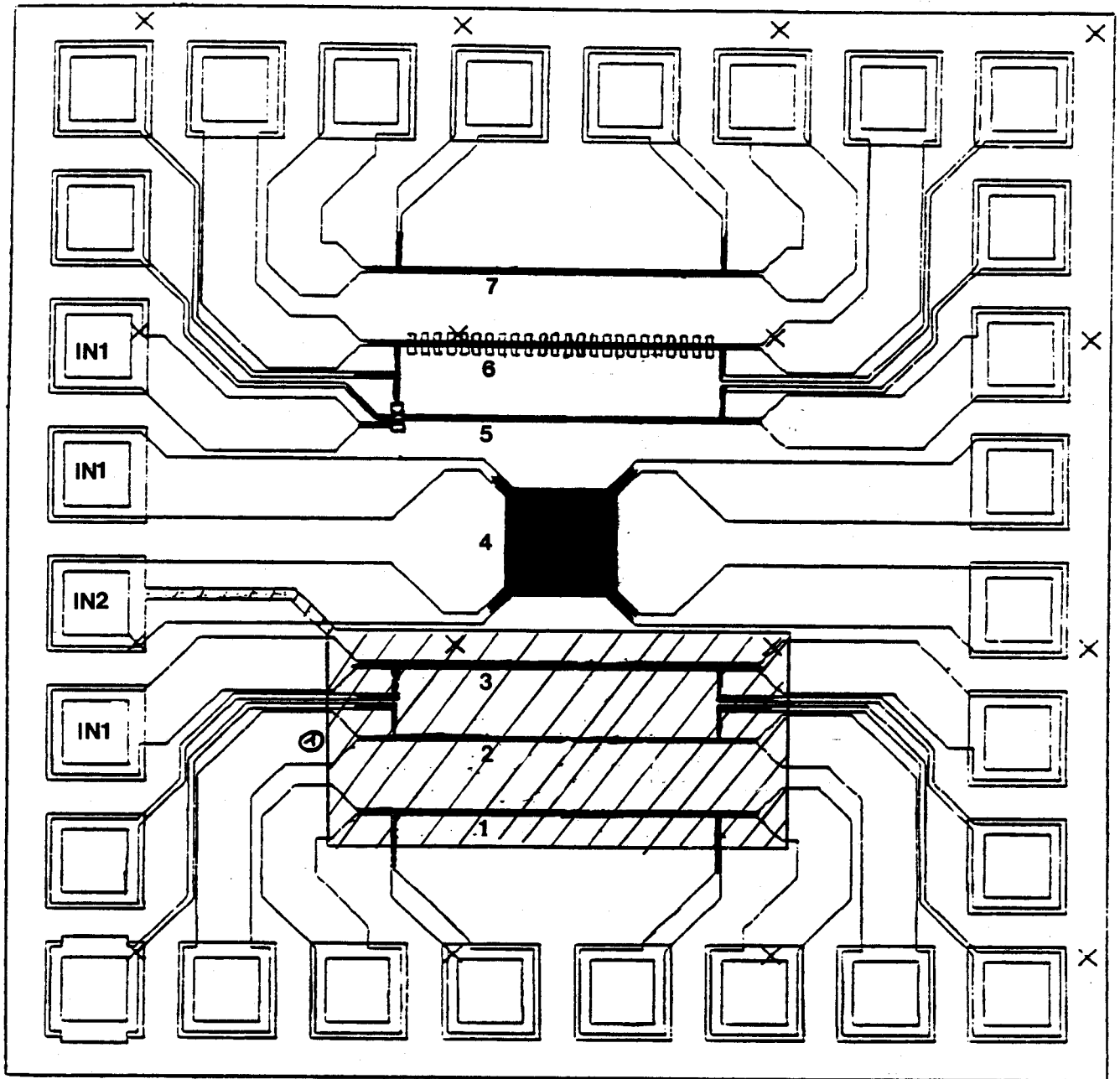


b) Serpentin et grille d'aluminium pour déterminer la résistance des interconnexions et leur isolation



c) Mofits de mesure des résistances de contact

Annexe 4-4 : Circuit de test d'électromigration



1, 2, 3, 5 et 6 : motifs servant aux tests d'électromigration

4 : Motif servant à mesurer la résistance carrée de la couche métallique IN1

QUALIFICATION DU PROCEDE PLANARISE SUR TDA8703C2 - TDA8708C2

FILE NUMBER	TYPE	PART NUMBER	PACKAGE	Qty	ASS. LOC.	DATE CODE	PROCESS	STRESS CONDITIONS	ELECTRICAL	RESULTS OBSERVAT.
G9230	TDA8703C2	13953 AL	SOT101	16	PEBEI	8931	R01974GC	OPERATING LIFE TEST : Tamb. = 125°C	168 H. : 0/16 504 H. : 0/16 1000 H. : 0/16	-
G9231	TDA8703C2	14058 AK	SOT101	16	PEBEI	8931	R01974GC	OPERATING LIFE TEST : Tamb. = 125°C	168 H. : 0/16 504 H. : 0/16 1000 H. : 0/16	-
G9304	TDA8703C2	13227 BF	SOT101	16	PEBEI	8936	R01974GC	OPERATING LIFE TEST : Tamb. = 125°C	168 H. : 0/16 504 H. : 0/16 1000 H. : 0/16	-
G9230	TDA8703C2	13953 AL	SOT101	22	PEBEI	8931	R01974GC	PRESSURE POT : 100% RH Ta = 120°C	100 H. : 0/22 200 H. : 0/22 300 H. : 3/22	See (1)
G9231	TDA8703C2	14058 AK	SOT101	22	PEBEI	8931	R01974GC	PRESSURE POT : 100% RH Ta = 120°C	100 H. : 0/22 200 H. : 0/22 300 H. : 2/22	See (2)
G9304	TDA8703C2	13227 BF	SOT101	22	PEBEI	8936	R01974GC	PRESSURE POT : 100% RH Ta = 120°C	100 H. : 0/22 200 H. : 0/22 300 H. : 0/22	-
G9230	TDA8703C2	13953 AL	SOT101	32	PEBEI	8931	R01974GC	TEMPERATURE CYCLING : (-65°C;+150°C) PRES.POT:100H 120C 100%RH	100 C. : 0/32 200 C. : 0/32 500 C. : 0/32 1000 C. : 0/32 + 100 H. : 0/32	
G9231	TDA8703C2	14058 AK	SOT101	32	PEBEI	8931	R01974GC	TEMPERATURE CYCLING : (-65°C;+150°C) PRES.POT:100H 120C 100%RH	100 C. : 0/32 200 C. : 0/32 500 C. : 0/32 1000 C. : 0/32 + 100 H. : 0/32	
G9304	TDA8703C2	13227 BF	SOT101	32	PEBEI	8936	R01974GC	TEMPERATURE CYCLING : (-65°C;+150°C) PRES.POT:100H 120C 100%RH	100 C. : 0/32 200 C. : 0/32 + 100 H. : 0/5 500 C. : 0/27 1000 C. : 0/27 + 100 H. : 0/27	
G9441	TDA8708C2	14536 AL	SOT117	27	PEBEI	8944	R01974GC	TEMPERATURE CYCLING : (-65°C;+150°C) PRES.POT:100H 120C 100%RH	100 C. : 0/27 200 C. : 0/27 + 100 H. : 0/5 500 C. : 0/22 + 100 H. : 0/22	
G9441	TDA8708C2	14536 AL	SOT117	22	PEBEI	8944	R01974GC	PRESSURE POT : 100% RH Ta = 120°C	100 H. : 0/22 200 H. : 0/22 300 H. : 0/22	-

(1)(2) Corrosion des plages de soudure. Ce défaut n'a aucun rapport avec le procédé planarisé.

- 17 T.R. Pampalone, J.J. DiPiazza, and D. P. Kanen
"Novolac Resin Planarization Layers for Multilayer Resist Imaging Systems"
Solid-State Science and Technology, pp 2394-2398, Nov 86.

Références bibliographiques : Chapitre 3

- 1 B. Chapman
Glow discharge processes
A Wiley-interscience publication - John Wiley & Sons
- 2 Peter H. Singer
"Dry etching of SiO_2 and Si_3N_4 "
Semiconductor international, pp 98-103, May 86.
- 3 S. Wolf, R. Tauber
Silicon processing for the VLSI ERA - Process technology -
Lattice Press, chap 16
- 4 J.W. Coburn, H.F. Winters
"Plasma etching - a discussion of mechanisms"
J. Vac. Sci. Technol., pp 391-403, Mars/April 79.
- 5 C.J. Mogab, A.C. Adams, and kD.L. Flamm
"Plasma etching of Si and SiO_2 - the effect of oxygene additions to CF_4
plasmas"
J. Appl. Phys., pp 3796-3803, July 1978
- 6 L. M. Loewenstein
"Selective etching of silicon nitride using remote plasmas of CF_4 and SF_6 "
J. Vac. Sci. Technol., pp 686-690, Mai/June 89.
- 7 R.A. Heinecke
Solid State Electronics, 18,1146 (1975)
- 8 M. Kitamura, H. Akiya and T. Urisu
"Polymer deposition and etching mechanisms in C_2F_6 radio-frequency
plasma as studied by laser-induced fluorescence"
J. Vac. Sci. Technol., pp 14-18, Janv/Feb 89.
- 9 J.R. Hollahan and A.T. Bell
Techniques and applications of plasma chemistry
Wiley-Interscience Publication



Une technique de planarisation, appelée "Resist Etch Back" ou "REB", est développée dans ce rapport de thèse ainsi que son application aux technologies bipolaires. Par l'introduction d'une étape de planarisation, nous cherchons à augmenter la fiabilité des circuits pouvant comporter jusqu'à trois niveaux de métallisation et permettre une future densification des circuits intégrés.

L'étude de la planarisation REB comprend deux parties :

1) La planarisation d'une topographie par de la résine.

Le but est d'étudier le fluage de la résine et de caractériser la qualité de la planarisation en fonction de la topographie par la réalisation d'un plan d'expérience.

2) La gravure par plasma de deux matériaux à la même vitesse : l'Etch-Back.

Cette deuxième partie comporte l'analyse des paramètres de gravure plasma de l'oxyde de silicium et de la résine, et la mise au point du procédé de gravure. Une modélisation numérique des principaux paramètres de gravure est définie par plan d'expérience.

Cette étape de planarisation est appliquée au procédé Subilo (SUBnanoseconde Isolation par Oxyde Localisé) ; un procédé industriel de chez Philips Composants à Caen qui permet la réalisation de circuits intégrés bipolaires à haute densité d'intégration. La qualité de la planarisation est évaluée sur plusieurs de ces circuits denses par des analyses topographiques et électriques. La reproductibilité du procédé de planarisation REB est ensuite étudiée par un suivi de paramètres de contrôle, dont les définitions sont indispensables à une industrialisation.

Ce procédé de planarisation est à présent appliqué en production pour une grande quantité de circuits et il représente une progression dans la qualité de fabrication des circuits intégrés bipolaires.

Mots Clés :

Planarisation

Procédés Multicouches

Etch-Back

Gravure Plasma



Circuits intégrés bipolaires

Fluage d'un polymère

Résine

Densification