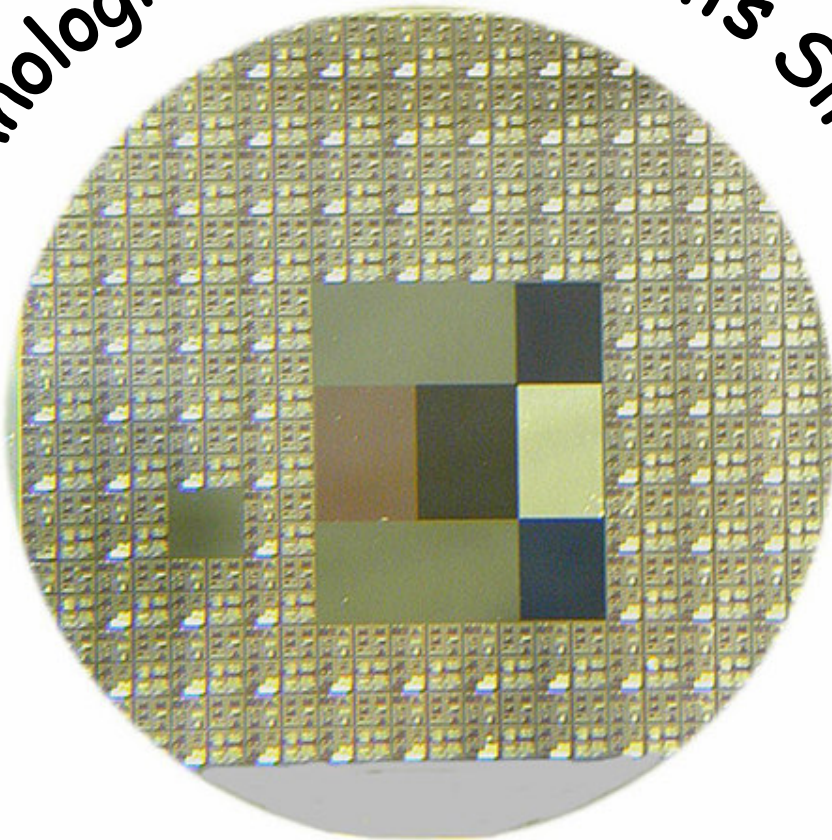




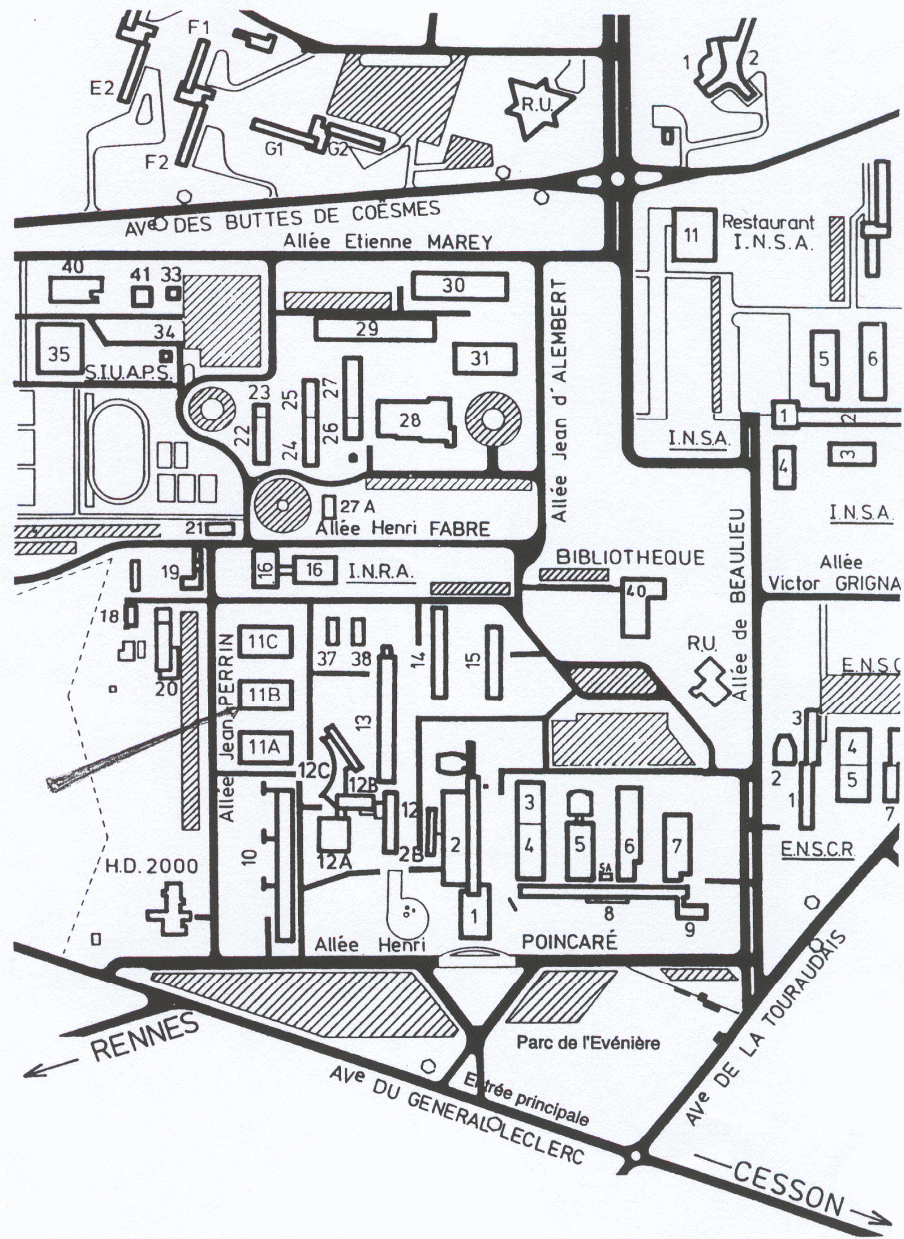
**MATERIAUX ET  
NANO TECHNOLOGIES**

Technologie des composants Silicium



T.P. 4<sup>ème</sup> Année

23 mai-10 juin 2005  
C.C.M.O.



**CAMPUS DE BEAULIEU**

# SOMMAIRE

1. <b>Introduction</b>	2
2. <b>Schémas du principe de réalisation d'un transistor MOS à 4 niveaux</b>	3
3. <b>Masques</b>	
• Structure des masques	4
• Composition du motif principal	5
• Schéma du motif principal	7
• Détail du motif principal	8
• Description du motif central de caractérisation	9
4. <b>Recommandations - Consignes de sécurité</b>	10
5. <b>Procédé de fabrication d'un transistor PMOS</b>	11
6. <b>Annexes</b>	16
• Pollution particulière de l'air et normes de classification des salles propres	17
• Dopage au bore	18
• Résine photosensible	19
• Gravure	21
• Métallisation	22
7. <b>Bibliographie</b>	24

## INTRODUCTION

L'objectif du T.P. est la **réalisation d'un transistor MOS à canal induit P**, à partir d'un wafer de silicium dopé N.

**Le T.P. sera effectué dans les locaux du Centre Commun de Microélectronique de l'Ouest (C.C.M.O.) qui se situe dans le bâtiment 11B de l'Université de Rennes I (allée Jean Perrin, campus de Beaulieu).**

Il s'agit d'un T.P. de longue durée (20h) effectué par petits groupes.

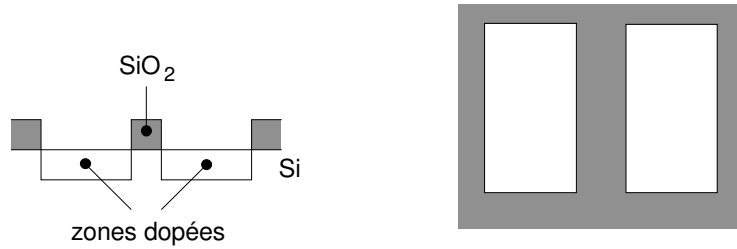
Ce T.P. fera l'objet d'un **COMPTE RENDU INDIVIDUEL** qui doit expliquer (et non seulement décrire) les processus physiques et chimiques mis en jeu dans les différentes étapes de la fabrication du transistor MOS (Cf. les annexes, le cours de Technologie des Composants et les ouvrages cités en bibliographie).

**LE COMPTE RENDU** devra **IMPERATIVEMENT** être remis à l'enseignant de TP sous huitaine après la fin du TP de chaque groupe (avant le **18 juin 2005** pour le dernier groupe).

NB : Les séances du matin commencent à 8 h

**SCHEMAS DU PRINCIPE DE REALISATION  
D'UN TRANSISTOR M.O.S. A 4 NIVEAUX**

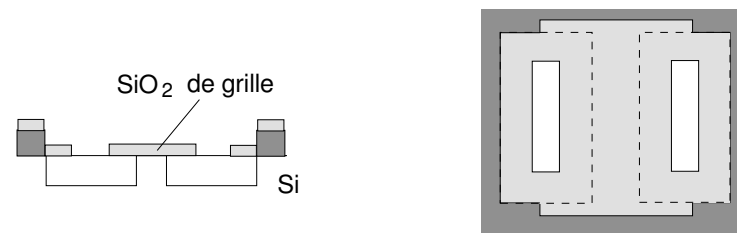
1. Ouverture des fenêtres source et drain à travers l'oxyde de masquage et dopage par diffusion.



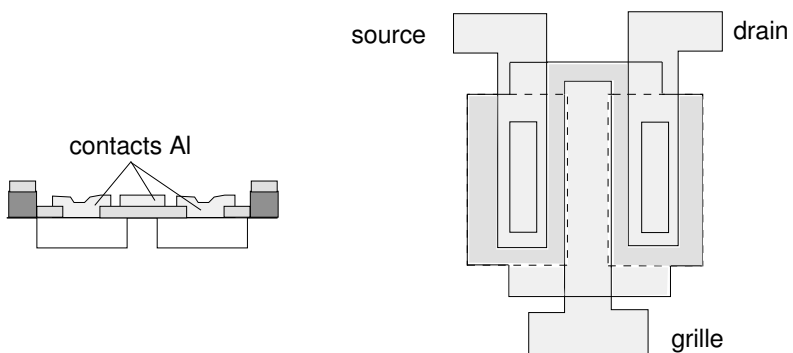
2. Gravure de l'oxyde de masquage au niveau de la grille



3. Oxydation sèche au niveau de la grille et ouverture des fenêtres de prises de contact source et drain



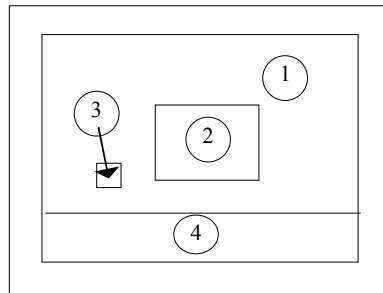
4. Dépôt d'aluminium et gravure de contacts métalliques



## STRUCTURE DES MASQUES

Les quatre masques se présentent sous forme de plaques de verre de format 2,5 pouces (63,5mm x 63,5mm) où les motifs sont définis par une couche de chrome de quelques dixièmes de micromètre d'épaisseur, traitée anti-reflet (chrome oxydé).

Chaque masque se décompose en quatre zones (cf. figure ci-dessous) :



### 1. Les motifs répétitifs dits motifs principaux.

Au total 111 motifs; dimension de chaque motif : 4,0 mm x 4,3 mm.

2. **Le motif central** destiné aux contrôles pendant ou après l'élaboration du composant (épaisseur et indice des couches d'oxydes déposées....)

Ce motif occupe la place de 20 motifs principaux.

3. **Le motif principal absent** (zone transparente) pour faciliter le pré-alignement des masques.

4. Une zone sans motif en bordure du masque destinée à faire les tests de détection de fin de désoxydation (hydrophobie du silicium).

## COMPOSITION DU MOTIF PRINCIPAL

Le motif principal (4000  $\mu\text{m}$  x 4300  $\mu\text{m}$ ) se compose de 19 groupes répartis en :

- 5 lignes (A, B, C, D, E)
- 4 colonnes (1, 2, 3, 4)

Chaque groupe présente 9 plots de sortie (130  $\mu\text{m}$  x 130  $\mu\text{m}$ , séparés de 70  $\mu\text{m}$ ) disposés selon la même géométrie.

La conception de ce masque permet différentes caractérisations :

- \* du procédé technologique
  - motifs d'alignement et de mesure des erreurs
  - évaluation de la photogravure
  - évaluations physiques ( $R_{\square}$ , Cox, Rc, Vt....)
- \* des transistors M.O.S.
  - avec différents W/L
  - conçus avec des règles larges, normales ou réduites
  - transistors appairés, transistors interdigités
  - réalisés sur de l'oxyde épais
- \* des composants passifs
  - résistances P+, avec différents W/L
  - appairage de résistances
  - interconnexions ( $R_{\square}$ , passage de marches)
- \* des circuits
  - inverseurs (N, R2)
  - oscillateurs en anneau (N, R2)
  - buffers, super buffers
  - amplificateurs
  - bascules JK
  - protection ESD
- \* des bipolaires
  - pnp latéral, mesures de durée de vie
  - diodes p+n
  - diodes Schottky

Les règles de dessin utilisées sont les suivantes :

\* règles normales (N)

dimensions minimales : 10  $\mu\text{m}$

(largeur d'un motif, distance entre 2 motifs)

erreurs maximales d'alignement : 6  $\mu\text{m}$

diffusion latérale : de 2 à 2,5  $\mu\text{m}$

gravure latérale d'oxyde : 0 à 1  $\mu\text{m}$

gravure latérale d'aluminium : 0 à 2  $\mu\text{m}$

\* règles larges (L)

2 fois les règles normales

\* règles réduites

R1 : 0,7 fois les règles normales

R2 : 0,5 fois les règles normales

R3 : 0,3 fois les règles normales.

Position des différents transistors M.O.S. (longueur L, largeur W du canal induit) :

réf.	L( $\mu\text{m}$ )	W( $\mu\text{m}$ )	W/L	zone	règles	plots
Q1	10	30	3	A3	N	1-3-5
Q2	20	60	3	C4	L	1-3-5
Q3	7	22	3	C4	R1	2-4-5
Q4	5	14	3	C4	R2	5-7-9
Q5	5	14	3	A4	R2	1-3-5
Q6	18	6	1/3	A4	R2	5-7-9
Q7	3	9	3	C4	R3	5-6-8
Q8	10	30	3	B1	N	1-8-9
Q10	33	100	3	B3	N	1-3-5
Q11	35	12	1/3	B3	N	5-7-9
Q12	35	12	1/3	A3	N	5-7-9
Q13	10	100	10	C3	N	5-6-8
Q14	10	1000	100	C3	N	1-3-5
Q15	10	30	3	C1	N	1-3-5
Q16	10	30	3	C1	N	5-7-9
Q17	25	248	10	D1	N	1-2-4
T48	23	200	9	B4	N	1-2-9

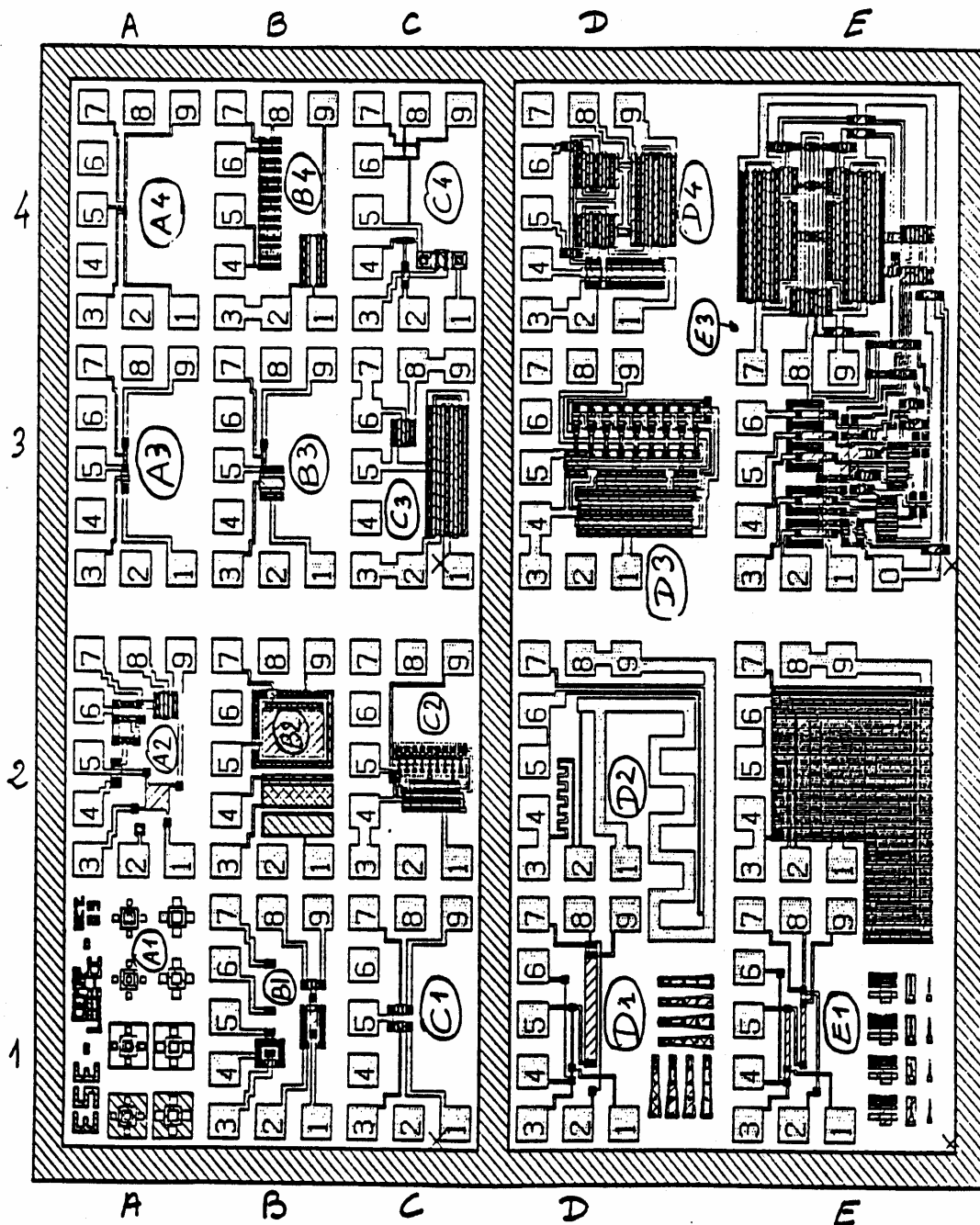


**Schéma du motif principal**

(échelle x 30)

Les masques comportent 111 fois ce motif.

Les motifs d'alignement sont situés dans la zone A1.



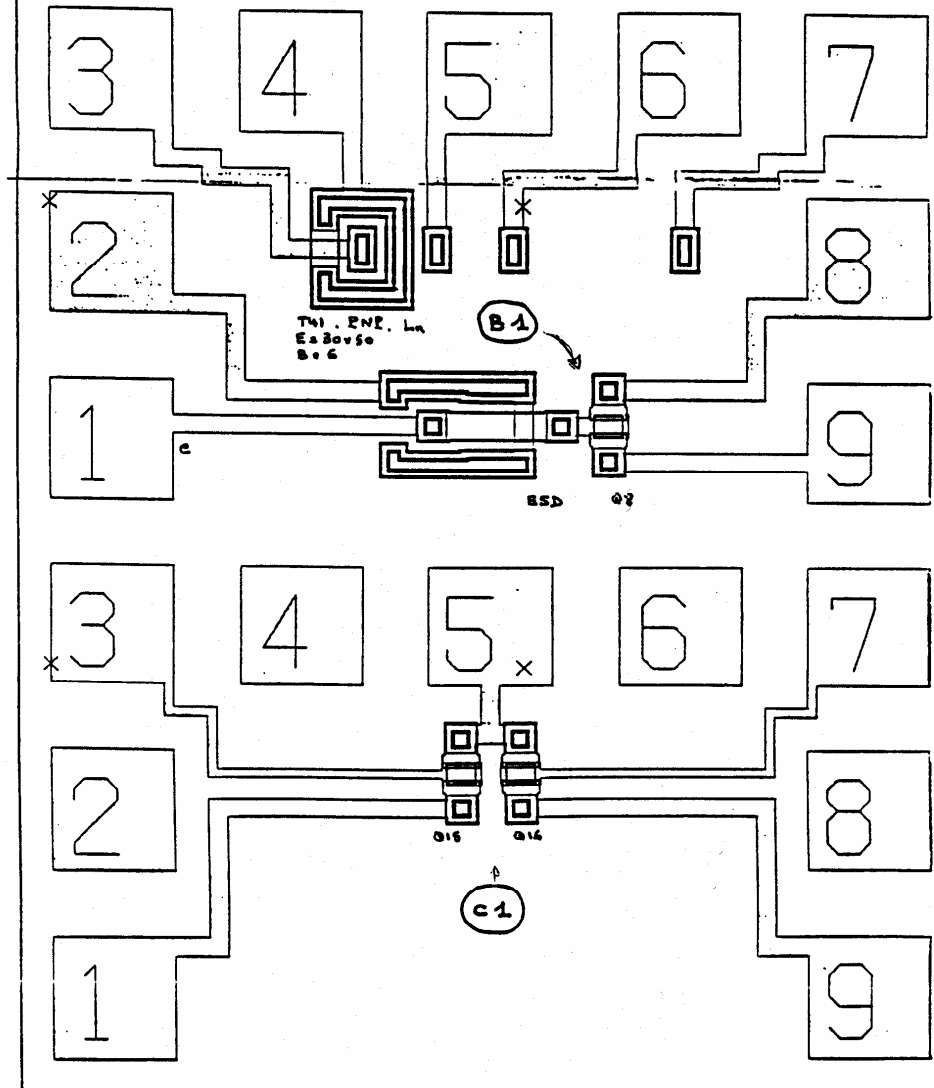
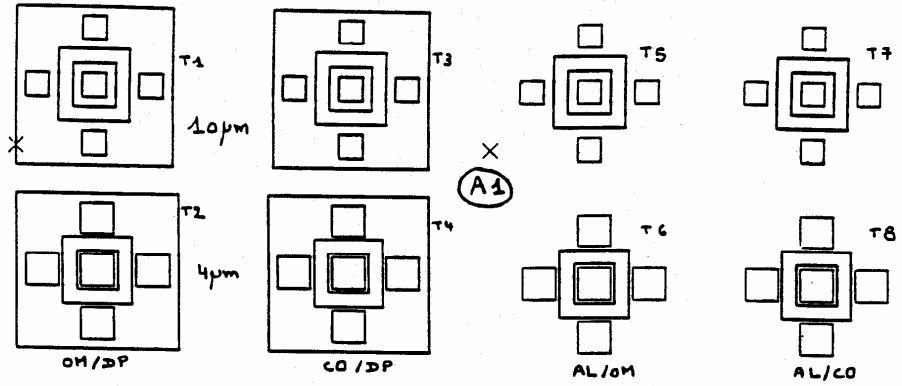
# ESE - CEMIP - OCT. 89

## LAAS-CC

Détail du motif principal :

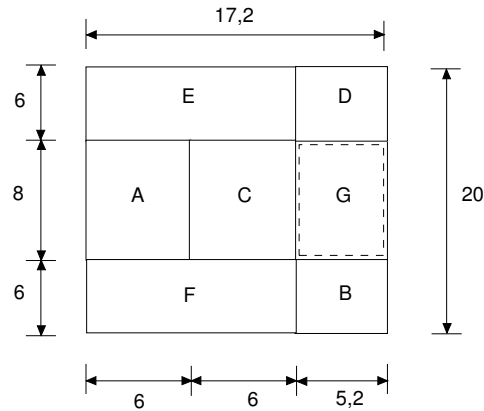
- Motifs d'alignement (A1)

- MOS (B<sub>1</sub> et C<sub>1</sub>)



**DESCRIPTION DU MOTIF  
CENTRAL DE CARACTERISATION**

Dans ce motif central, différentes zones ont été réservées pour le contrôle de chaque étape une fois l'ensemble réalisé.



Les dimensions sont en mm.

Le pointillé de la région G représente la limite du dépôt d'aluminium.

Le tableau suivant regroupe les caractéristiques de chacune des régions :

Région	Caractéristiques	Masques			
		1.DP	2.0M	3.CO	4.AL
A	Si(N) + SiO <sub>2</sub> épais + SiO <sub>2</sub> mince	0	0	0	T
B	Si(P+) + SiO <sub>2</sub> mince	T	0	0	T
C	Si(N) + SiO <sub>2</sub> mince	0	T	0	T
D	Si(P+) + SiO <sub>2</sub> mince	T	T	0	T
E	Si(P+) à découvert	T	T	T	T
F	Si(N) à découvert	0	T	T	T
G	Si(N) + SiO <sub>2</sub> mince + Al	0	T	0	0

(T : masque transparent, 0 : masque opaque)

## RECOMMANDATIONS - CONSIGNES DE SECURITE

### AVANT TOUTE ENTREE EN SALLE BLANCHE :

- Laissez les vêtements de ville et les sacs dans la salle extérieure prévue à cet usage.
- L'entrée en salle blanche *sans combinaison ni gants* est interdite
- Veillez à ne pas entrer dans le SAS de la salle blanche avec des chaussures boueuses ou mouillées (utilisez les paillasons à l'entrée du bâtiment et du SAS) .
- Limitez le nombre d'objets et de documents qui entrent en salle blanche : se munir du photocopie du process et d'un stylo à bille (crayon à mine carbone et littérature personnelle sont proscrits).
- Quand vous manipulez les plaquettes de silicium, prenez garde à la *contamination invisible*.

### EN SALLE BLANCHE : CONSIGNES DE SECURITE A SUIVRE IMPERATIVEMENT

- Manipulez avec précaution les produits chimiques
- Se protéger à l'aide des gants en Kevlar lors de manipulation près des fours

#### Quand vous manipulez des produits chimiques:

- Portez obligatoirement des gants et des lunettes de protection pour les manipulations de produits chimiques suivants :
  - Ammoniaque (  $\text{NH}_3$  ) Acide chlorhydrique (  $\text{HCl}$  )
  - Acide fluorhydrique (  $\text{HF}$  )

Cet acide et ses solutions aqueuses peuvent entraîner, en cas de projection accidentelle sur la peau et (ou) les muqueuses, des brûlures chimiques très sévères.

Il existe un *traitement antidotique* : il s'agit de l'application d'un gel de gluconate de calcium à 2,5 %, après lavage à l'eau courante, abondant et immédiat, pendant 15 à 20 minutes. Ce gel sera appliqué en couches épaisses sous pansement occlusif toutes les 3 heures pendant 48 heures.

- Solution de gravure  $\text{SiO}_2$  (  $\text{HF}$  à 5 % )
  - Solution de gravure Aluminium (acide phosphorique  $\text{H}_3 \text{PO}_4$  à 67%)
  - Résine photosensible positive (réf: *SHIPLEY S1818*).
- Opérez sous une hotte bien ventilée
  - Informez-vous sur la réactivité chimique et la toxicologie des produits utilisés.

**PROCEDE DE FABRICATION  
D'UN TRANSISTOR M.O.S.**

1. nettoyage
2. oxydation de masquage
3. ouverture de la source et du drain (masque M1)
4. diffusion de bore pour source et drain
5. ouverture de la zone de grille (masque M2)
6. nettoyage
7. oxydation de grille
8. ouverture des contacts (masque M3)
9. dépôt d'aluminium
10. gravure de l'aluminium (masque M4)
11. recuit de l'aluminium
12. caractérisation

IDENTIFICATION DES RONDELLES (wafers)	orientation : <100> type : N dopage : phosphore $2 \cdot 10^{15}$ à $10^{16} \text{cm}^{-3}$ résistivité : 2 à 5 $\Omega \cdot \text{cm}$ épaisseur : $280 \pm 25 \mu\text{m}$
TECHNOLOGIE  PMOS grille Al	n° des rondelles :

1.	NETTOYAGE RCA	TEMP (°C)	DUREE (min)	REMARQUES
	SC1 : H <sub>2</sub> O + NH <sub>4</sub> OH + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (5) (1/4) (1) rinçage H <sub>2</sub> O.DI (désionisée)	70	10 5	200/10/40 cm <sup>3</sup>
	SC2 : H <sub>2</sub> O + HCl + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (5) (1) (1) rinçage H <sub>2</sub> O.DI désoxydation HF à 2% rinçage H <sub>2</sub> O.DI séchage azote	80	10 5 qq sec 10	200/40/40 cm <sup>3</sup>  test : hydrophobie
2.	OXYDATION HUMIDE four n°2	TEMP (°C)	DUREE (min)	DEBITS DE GAZ
	SiO <sub>2</sub> : épaisseur : ~600nm  nacelle à l'entrée entrée début d'oxydation oxydation sèche oxydation humide recuit sortie	1100	120  5 10 5 10 60 20 10	  N <sub>2</sub> : 2 l/min N <sub>2</sub> : 2 l/min N <sub>2</sub> : 1,25 + O <sub>2</sub> : 1,25 l/min O <sub>2</sub> : 2,5 l/min O <sub>2</sub> : 1,8 l/min+ H <sub>2</sub> : 3,1 l/min N <sub>2</sub> : 2 l/min N <sub>2</sub> : 2 l/min
Contrôle : couleur, épaisseur et indice de la couche épaisse de SiO <sub>2</sub>				

3.	OUVERTURE DE LA SOURCE ET DU DRAIN	TEMP (°C)	DUREE (min)	REMARQUES	Départ
	* chauffage du wafer sur plaque chauffante	100	1,5		
	* enduction avec résine positive (ép. ~ 1,8mm) SHIPLEY S1818		30 s	4000 tr/min – nettoyage tournette : acétone	
	* pré cuisson sur plaque chauffante	100	1,5		
	* insolation à travers le masque M1		6 s	aligneur Karl Suss	
	* développement		60 s	dév. dilué 1+1 avec H <sub>2</sub> O.DI.	
	rinçage H <sub>2</sub> O.DI		10	agiter	
	séchage azote			OK ?	
	contrôle microscope				
	* cuisson plaque chauffante	120	1,5		
	* gravure chimique SiO <sub>2</sub> (NH <sub>4</sub> F+HF à 5%)	20	.....	65nm/min (hydrophobie+5s)	
	rinçage H <sub>2</sub> O.DI		10		
	séchage azote			OK ?	
	contrôle microscope				
	* délaquage	20	5	Remove	
	rinçage H <sub>2</sub> O.DI		10		
	séchage azote				
	contrôle microscope			OK ?	
4.	DIFFUSION BORE (plaquettes BN réactivées) four n°5	TEMP (°C)	DUREE (min)	REMARQUES DEBITS DE GAZ	1
	* prédépôt	1050	55	alternance plaquette BN/Si	
	nacelle à l'entrée		5	N <sub>2</sub> : 2 λ/min	
	entrée		10	N <sub>2</sub> : 2 λ/min	
	prédépôt		30	N <sub>2</sub> : 1 λ/min (extrémité du four fermée)	
	sortie		10	N <sub>2</sub> : 2 λ/min	
	* décapage du dépôt (HF à 10%)		~30 s	(cf. mode opératoire p.15) hydrophobie	
	rinçage H <sub>2</sub> O.DI		10		
	séchage azote			OK ?	
	contrôle microscope				
	* diffusion du bore	1050	40		
	nacelle à l'entrée		5	N <sub>2</sub> : 2 λ/min	
	entrée		10	N <sub>2</sub> : 2 λ/min	
	diffusion		15	N <sub>2</sub> : 2 λ/min (extrémité du four fermée)	
	sortie		10	N <sub>2</sub> : 2 λ/min (diffusion de B ~ 2 μm)	

5.	<b>OUVERTURE DE LA ZONE GRILLE</b>	<b>TEMP (°C)</b>	<b>DUREE (min)</b>	<b>REMARQUES</b>
	* chauffage du wafer sur plaque chauffante	100	1,5	
	* enduction résine		30 s	4000 tr/min - nettoyage tournette : acétone
	* précuisson sur plaque chauffante	100	1,5	
	* insolation à travers le masque M2		6 s	aligneur Karl Suss
	* développement		60 s	dév. dilué 1+1 avec H <sub>2</sub> O.DI. agiter.
	rinçage H <sub>2</sub> O.DI		10	
	séchage azote			OK ?
	contrôle microscope			
	* cuisson plaque chauffante	120	1,5	
	* gravure chimique SiO <sub>2</sub>	20	idem 3	65 nm/min
	rinçage H <sub>2</sub> O.DI		10	
	séchage azote			OK ?
	contrôle microscope			
	* délaquage	20	5	Remover
	rinçage H <sub>2</sub> O.DI		10	
	séchage azote			OK ?
	contrôle microscope			
6.	<b>NETTOYAGE RCA</b>	<b>TEMP (°C)</b>	<b>DUREE (min)</b>	<b>REMARQUES</b>
	SC1 : H <sub>2</sub> O+NH <sub>4</sub> OH+H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (5) (1/4) (1)	70	10	200/10/40 cm <sup>3</sup>
	rinçage H <sub>2</sub> O.DI		5	
	SC2 : H <sub>2</sub> O + HCl + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (5) (1) (1)	80	10	200/40/40cm <sup>3</sup>
	rinçage H <sub>2</sub> O.DI		5	
	désoxydation HF à 2%		qq sec	hydrophobie
	rinçage H <sub>2</sub> O.DI		20	
	séchage azote			
7.	<b>OXYDATION SECHE MOS four n°4</b>	<b>TEMP (°C)</b>	<b>DUREE (min)</b>	<b>DEBITS DE GAZ</b>
	SiO <sub>2</sub> : ép. ~ 80 nm	1100	75	
	nacelle à l'entrée		5	N <sub>2</sub> : 2 λ/min
	entrée		10	N <sub>2</sub> : 2 λ/min
	début d'oxydation		10	N <sub>2</sub> : 1,25 + O <sub>2</sub> : 1,25 λ/min
	oxydation sèche		20	O <sub>2</sub> : 2,5 λ/min
	recuit		20	N <sub>2</sub> : 2 λ/min
	sortie		10	N <sub>2</sub> : 2 λ/min
	Contrôle : couleur, épaisseur et indice de la couche mince de SiO <sub>2</sub>			

8.	OUVERTURE DES CONTACTS	TEMP (°C)	DUREE (min)	REMARQUES	
	* chauffage du wafer sur plaque chauffante	100	1,5		
	* enduction résine		30 s	4000 tr/min – nettoyage tournette : acétone	
	* précuisson sur plaque chauffante	100	1,5		
	* insolation à travers le masque M3		6 s	aligneur Karl Suss	
	* développement		60 s	dév. dilué 1+1 avec H <sub>2</sub> O.DI. agiter.	
	rinçage H <sub>2</sub> O.DI séchage azote contrôle microscope		10	OK ?	
	* cuisson sur plaque chauffante	120	1,5		
	* gravure chimique SiO <sub>2</sub> rinçage H <sub>2</sub> O.DI séchage azote contrôle microscope	20	<2 10	65 nm/min (hydrophobie+5s)  OK ?	
	* délaquage rinçage H <sub>2</sub> O.DI séchage azote contrôle microscope	20	5 10	Remover  OK ?	
9.	DEPOT D'ALUMINIUM	épaisseur	vitesse	vide	
	Al + 1% Si	300 nm			durée du dépôt ~20 min
10.	GRAVURE DE L'ALUMINIUM	TEMP (°C)	DUREE (min)	REMARQUES	
	* chauffage du wafer sur plaque chauffante	100	1,5		
	* enduction résine		30 s	4000 tr/min -nettoyage tournette : acétone	
	* précuisson sur plaque	100	1,5		
	* insolation à travers le masque M4		6 s	aligneur Karl Suss	
	* développement		60 s	dév. dilué 1+1 avec H <sub>2</sub> O.DI. agiter	
	rinçage H <sub>2</sub> O.DI séchage azote contrôle microscope		10	OK ?	
	* cuisson sur plaque	120	1,5		
	* gravure Al(H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> à 67%) rinçage H <sub>2</sub> O.DI séchage azote contrôle microscope	60	qq sec 10	solution à chauffer  OK ?	
	* délaquage rinçage H <sub>2</sub> O.DI séchage azote contrôle microscope	20	5 10	Remover  OK ?	



11.	RECUIT D'ALUMINIUM four n°3	TEMP (°C)	DUREE (min)	DEBITS DE GAZ	3
	nacelle à l'entrée	390	5	N <sub>2</sub> : 2 λ/min	
	entrée		10	N <sub>2</sub> : 2 λ/min	
	recuit		30	Forming gaz : 2 λ/min	
sortie	10		N <sub>2</sub> : 2 λ/min		
12.	CARACTERISATION				
<b>RELEVÉ DES CARACTERISTIQUES :</b>					
$\left\{ \begin{array}{l} I_D = f(V_{DS}) \quad \text{pour différents } V_G \\ \sqrt{I_D} = f(V_G) \quad \text{pour } V_{DS} = \text{Cte et pour différents rapports W/L} \end{array} \right.$					

### DECAPAGE DE B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

#### ➤ Préparation

Opérations à effectuer environ 15 min avant de graver. **Sous la hotte chimique :**

- Mettre sur la plaque chauffante un béccher en **verre** contenant environ 400 cm<sup>3</sup> d'eau désionisée
- Placer dans la cuve à ultrasons le béccher **plastique** «gravure verre de bore» avec une solution de HF à 10% ( 250 cm<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>O DI + 50 cm<sup>3</sup> de HF à 50% ) ; actionner le chauffage

NB : La solution de HF est une solution non tamponnée : elle doit être renouvelée après 2 à 3 usages.

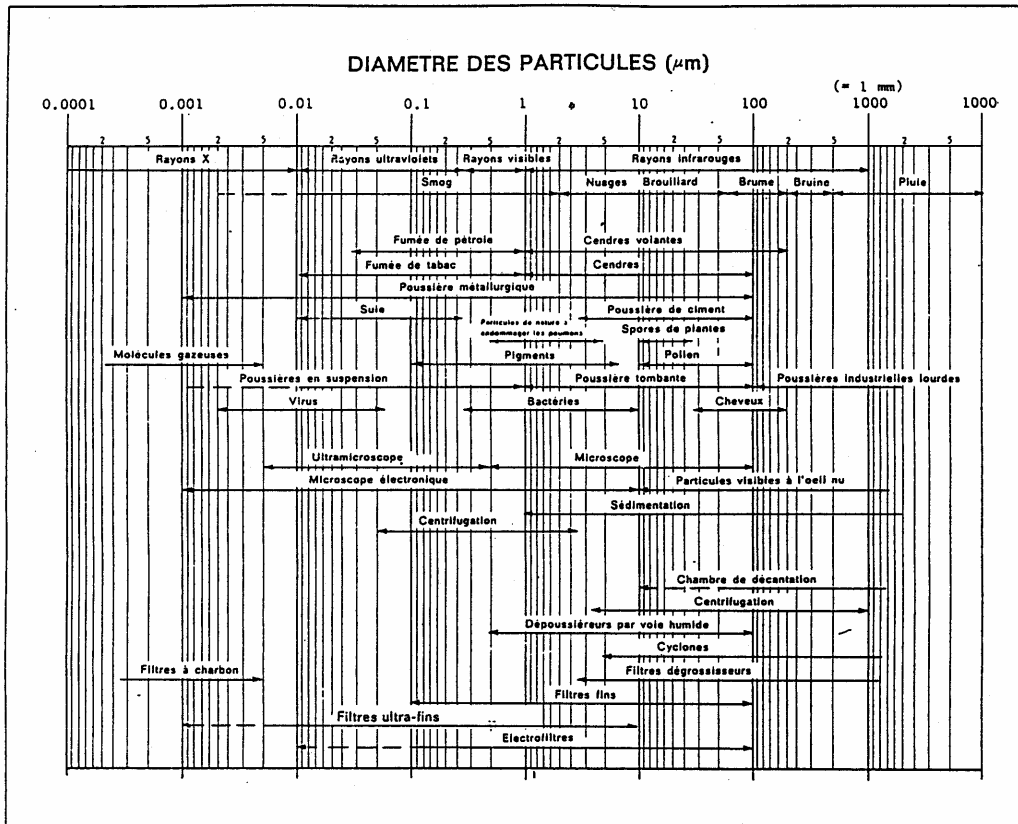
#### ➤ Gravure

- Plonger les plaquettes (avec le témoin) dans l'eau portée à ébullition, pendant ~5 min
- Actionner les ultrasons :
  - ❑ Prélever le témoin, le plonger dans la solution de HF et déterminer son temps de gravure (temps nécessaire pour obtenir l'hydrophobie) : ce temps est de l'ordre de 30 s à 1 min suivant l'état de la solution et sa température.
  - ❑ Plonger ensuite les autres plaquettes dans la solution de HF pendant le temps défini ci-dessus
- Rincer 10 min
- Sécher
- Contrôler au microscope : si le temps de gravure est insuffisant, on peut prolonger la gravure (~15 s)

**ANNEXES**

**Réalisation d'un transistor PMOS**

## Pollution particulaire de l'air



Grosseur des particules de quelques impuretés atmosphériques ordinaires. (Document CAMFIL).

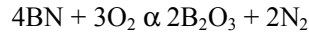
## • NORMES - CLASSES D'EMPOUSSIEREMENT

CLASSE		TAILLE DE PARTICULES									
		0,1 $\mu\text{m}$		0,2 $\mu\text{m}$		0,3 $\mu\text{m}$		0,5 $\mu\text{m}$		5 $\mu\text{m}$	
SI	Anglo-saxon	Unité de volume		Unité de Volume		Unité de Volume		Unité de Volume		Unité de Volume	
		(m <sup>3</sup> )	(ft <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(ft <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(ft <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(ft <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(ft <sup>3</sup> )
M1		350	9.91	75.7	2.14	30.9	0.875	10.0	0.283	-	-
M1.5	1	1240	35.0	265	7.50	106	3.00	35.3	1.00	-	-
M2		3500	99.1	757	21.4	309	8.75	100	2.83	-	-
M2.5	10	12400	350	2650	75.0	1060	30.0	353	10.0	-	-
M3		35000	991	7570	214	3090	87.5	1000	28.3	-	-
M3.5	100	-	-	26500	750	10600	300	3530	100	-	-
M4		-	-	75700	2140	30900	875	10000	283	-	-
M4.5	1000	-	-	-	-	-	-	35300	1000	247	7.00
M5		-	-	-	-	-	-	100000	2830	618	17.5
M5.5	10000	-	-	-	-	-	-	353000	10000	2470	70.0
M6		-	-	-	-	-	-	1000000	28300	6180	175
M6.5	100000	-	-	-	-	-	-	3350000	100000	24700	700
M7		-	-	-	-	-	-	10000000	283000	61800	1750

\* ft<sup>3</sup> = pied cube = 28 d<sup>3</sup>.

## DOPAGE AU BORE

- Le dopage du silicium avec du bore est réalisé avec des plaquettes de nitrure de bore (BN) réactivées. La réactivation consiste à oxyder les plaquettes dans un four à 1050°C.



Il se forme alors, en surface, une couche d'anhydride borique ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) encore appelé verre de bore.

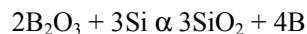
- Le processus du dopage des plaquettes de silicium s'effectue en trois étapes :

### 1. Dépôt de $\text{B}_2\text{O}_3$ à 1050°C

A cette température,  $\text{B}_2\text{O}_3$  est transporté sous forme gazeuse par un flux d'azote et se dépose à la surface des plaquettes de silicium.

Il en résulte :

- à l'interface Si/ $\text{B}_2\text{O}_3$ , une réaction conduisant à la libération du bore et la formation d'une mince couche d'oxyde de silicium :



- et ensuite le dépôt d'une couche épaisse de  $\text{B}_2\text{O}_3$  car  $\text{SiO}_2$  empêche  $\text{B}_2\text{O}_3$  d'atteindre la surface de Si.

### 2. Elimination du $\text{B}_2\text{O}_3$

Il faut impérativement éliminer la couche de  $\text{B}_2\text{O}_3$  pour permettre la prise des contacts à la surface des zones dopées (source et drain)

Le verre de bore est soluble dans HF. Comme  $\text{SiO}_2$  l'est également cette opération amincit sensiblement l'épaisseur de la couche de masquage.

### 3. Diffusion du bore, en volume, à 1050°C : Cf. cours et bibliographie

*Données :*

Constante de diffusion du bore dans le silicium, à 1050 °C :  $5 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Solubilité du bore dans le silicium, à 1150 °C :  $2,4 \cdot 10^{20} \text{ at} \cdot \text{cm}^{-3}$

## RESINE PHOTSENSIBLE

### 1. Propriétés de la résine :

Il existe *deux types de résine* : les **résines positives** pour lesquelles les zones gravées seront les zones insolées, et les **résines négatives** au comportement opposé. Nous ne présenterons ici que les résines positives.

La résine doit posséder des propriétés physico-chimiques bien définies :

- fluidité ↔ viscosité.
- photosensibilité U.V. ↔ faible sensibilité dans le visible.
- rapidité de développement ↔ netteté des fronts de gravure.
- adhérence au substrat ↔ facilité de délaquage.
- réactivité ↔ stabilité dans le temps.
- sensibilité aux solutions développantes ↔ absence de sensibilité aux acides.

### 2. Composition de la résine :

La solution de résine comprend *trois composés* :

- 1 **La résine** : elle constituera la couche de masquage, elle est peu sensible à l'insolation aux UV et sera donc activée. Elle possède à elle seule la plupart des propriétés recherchées : *tenue mécanique, résistance aux acides, stabilité dans le temps*.
- 2 **Le solvant** : il permet d'ajuster la *fluidité* et la *viscosité* de la solution afin de permettre un étalement uniforme sur le substrat ( acétate d'éther méthylique et de propylène glycol ).
- 3 **L'activateur** (diazonaphthoquinone) : c'est un composé photosensible dont la décomposition produit de nombreux radicaux libres très actifs.

### 3. Dépôt et précuisson :

Le dépôt de la résine s'effectue sur une *tournette* dont on règle l'**accélération initiale** (*uniformité*) et la **vitesse de rotation** (*épaisseur*). Il se forme toujours un bourrelet de résine sur le bord de la plaque ce qui rend inutilisable les motifs en bordure.

#### **Remarque :**

L'adhérence de la résine dépend de la nature de la surface (silicium, verre de bore, oxyde). La résine ( hydrophobe) adhère fortement aux surfaces hydrophobes (silicium) et faiblement aux surfaces hydrophiles (verre de bore, oxyde de silicium).

Après le dépôt, la résine est **précuite** sur une plaque chauffante régulée afin d'évaporer le solvant et de durcir la résine.

#### 4. Insolation, développement, cuisson et délaquage :

L'insolation induit donc la modification des propriétés de la résine.

*On notera que :*

- La résine insolée forme un **acide carboxylique** soluble dans les solvants aqueux basiques. On rappelle que la résine non insolée est *hydrophobe* donc insoluble dans ces solvants.
- L'insolation n'induit pas de polymérisation de la résine ce qui permet la réalisation de fronts de gravures raides ( ce n'est pas le cas pour la résine négative ).
- Le développement par une *solution basique* doit être suivi d'un rinçage prolongé afin d'éliminer au maximum les résidus.

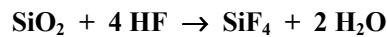
La résine est alors **recuite** sur une plaque chauffante régulée.

Après gravure de l'oxyde ( décrite plus loin ), l'échantillon est totalement délaqué.

# GRAVURE

## 1. Gravure de l'oxyde de silicium (SiO<sub>2</sub>) :

L'oxyde de silicium SiO<sub>2</sub> n'est attaqué que par *l'acide fluorhydrique* HF. La vitesse de la gravure dépend de la concentration en protons et donc du pH. Afin de conserver des vitesses de gravure constantes tout au long des utilisations, les solutions sont tamponnées (mélange d'acide HF et de fluorure F<sup>-</sup> introduit sous la forme d'un sel soluble de *fluorure d'ammonium* NH<sub>4</sub> F). Le pH de la solution est donc pratiquement constant :



Le silicium n'est pas attaqué par cette solution et son *hydrophobie* permet de repérer avec précision les fins de gravure ( 10 nm d'oxyde suffisent à conserver une surface hydrophile ).

La solution de gravure utilisée contient **5 %** d'acide fluorhydrique et sa vitesse de gravure moyenne est de **65 nm/min**.

**Attention !** *H.F. est dangereux à concentration élevée. Il pénètre facilement dans l'organisme où il cause de sévères dommages aux tissus et aux os.*

***Rincez-vous immédiatement et abondamment à l'eau en cas de contact avec la peau !...***

## 2. Gravure du verre de bore (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

La gravure du verre de bore est effectuée dans une solution d'acide fluorhydrique à 10% (cf.15).

## 3. Gravure de l'aluminium :

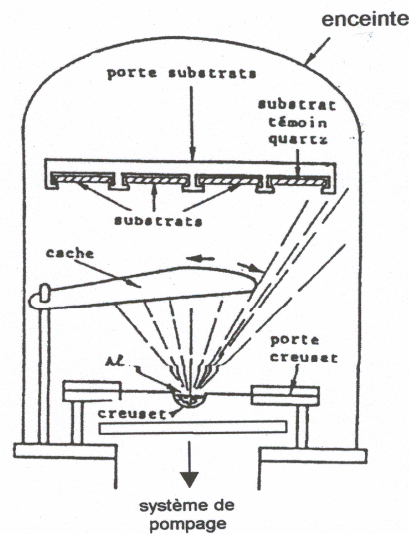
L'aluminium est un métal très *électropositif* donc à priori facile à attaquer par n'importe quelle solution acide. En réalité, la couche d'oxyde superficielle protège d'une attaque en profondeur.

La gravure de l'aluminium se fait donc avec une solution acide (*acide phosphorique H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> à 67 %*) afin de solubiliser l'oxyde superficiel.

# METALLISATION

## 1. Dépôt

L'aluminium est très électropositif. Le dépôt s'effectuant en phase vapeur, il est impératif que l'enceinte de dépôt soit exempte de toute espèce oxydante. On réalise donc un vide poussé ( $10^{-6}$  mbar).



*Schéma du bâti d'évaporation d'aluminium sous vide.*

Le creuset contenant les lingots d'aluminium est traversé par un courant électrique d'intensité croissante (jusqu'à 200 A). Après dégazage des impuretés adsorbées, on enlève le cache et l'aluminium vaporisé se condense sur les échantillons.

L'épaisseur déposée est contrôlée avec une microbalance à quartz (Edwards FTM6) dont le principe repose sur la variation de la fréquence d'oscillation d'un cristal piézoélectrique en fonction de sa surcharge en masse. Ainsi lors du dépôt, la fréquence du quartz se modifie en fonction de l'épaisseur de métal déposé et ce décalage de fréquence renseigne sur l'épaisseur de métal déposée (après étalonnage).

Lors de la fusion des lingots d'aluminium ( $T_f = 660$  °C sous 1 atm), la modification de la conductivité de l'ensemble creuset-lingots conduit à une baisse de température. Il faut alors légèrement augmenter le courant dans le creuset pour éviter toute ressolidification. En effet, le creuset constitué de tungstène ( $T_f = 3410$  °C sous 1 atm), et l'alliage que l'on solidifie alors possède une température de fusion nettement supérieure à celle que l'on peut espérer atteindre avec le dispositif.



Durant tout le dépôt, la pression dans l'enceinte doit demeurer inférieure à  $10^{-5}$  mbar. Si ceci n'est pas vérifié alors l'aluminium se déposera sous forme oxydée (l'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  par exemple).

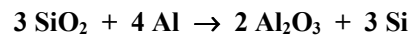
Ne pas déposer trop de métal sur les plaques sinon les motifs deviennent invisibles et l'alignement du dernier masque (masque n°4 : isolation des contacts) est rendu impossible.

## 2. Recuit

La dernière étape du procédé est un recuit basse température (390 °C) en atmosphère réductrice ; le Forming-gaz étant un mélange  $\text{H}_2$  (10%) /  $\text{N}_2$  (90%).

A cette température, le silicium est soluble dans l'aluminium (< 1% en masse). Le recuit améliore donc chimiquement l'interface Al/Si (cette 'solubilisation' consommant du silicium, les lingots utilisés lors du dépôt contiennent 1 % de silicium, le métal déposé est donc déjà chargé en silicium).

Une surface de silicium nue s'oxyde superficiellement très rapidement. Lors de la métallisation, l'aluminium réalise donc un contact de mauvaise qualité avec le silicium. Durant le recuit, cette couche est réduite selon la réaction suivante :



Les résistances de drain et de source sont très *nettement diminuées* : les zones linéaires des caractéristiques  $I_d$  ( $V_{ds}$ ) des transistors M.O.S. sont plus raides.

Le recuit permet aussi une meilleure adhérence entre l'aluminium et l'oxyde ce qui favorise l'accrochage du métal sur les surfaces isolantes.

## BIBLIOGRAPHIE

### \* TECHNOLOGIE DES COMPOSANTS

- A. BAURANT, F. TARDIF, C. WYON, Caractérisation physico-chimique et nettoyage par voie humide (Hermès, 2003)
- R. BESSON, Technologie des composants électroniques, Tome 2 (1990)
- P.V. BOSSCHELLE, Technologie des semiconducteurs et des circuits intégrés (1985)
- M. CAND, E. DEMOULIN, J.L. LARDY, P. SENN, Conception des circuits intégrés MOS (1985)
- C.Y. CHANG, S.M. SZE, ULSI Technology (1996)
- D.J. ELLIOTT, Integrated circuit fabrication technology (1982)
- P.N. FAVENNEC, Technologie pour les composants à semiconducteurs (1996)
- A.B. GLASER, G.E. SUBAK-SHARPE, Integrated circuit engineering (1979)
- D.C. GUPTA, Silicon processing. Semiconductor processing (1983)
- D.C. GUPTA, Semiconductor processing (1984)
- L.F. THOMPSON, C.G. WILLSON, M.J. BOWDEN, Introduction to microlithography (1983).
- S.M. SZE, VLSI Technolgy (1983)
- W. WHYTE, S. BRESIN, Les salles propres (1993)

### \* PHYSIQUE DES COMPOSANTS

- I. BRODIE, J.J. MURAY, The physics of microfabrication (1982)
- N.G. EINSRUICH, VLSI Handbook (1985)
- E.H. NICOLLIAN, J.R. BREWS, MOS Physics and Technology (1982)
- S.M. SZE, Physics of semiconductor devices (1981)

### \* DICTIONNAIRE DES COMPOSANTS ELECTRONIQUES (1994)

#### • SITES WEB

<http://www.microelectronique.univ-rennes1.fr>

<http://www.cnfm.fr>

### \* DIAPORAMA "TOP35" dans le dossier public (salle MNT--Micro)