
TRAVAIL PRATIQUE DE TECHNOLOGIE
MICROELECTRONIQUE

REALISATION ET ETUDE
D'UNE CAPACITE MOS

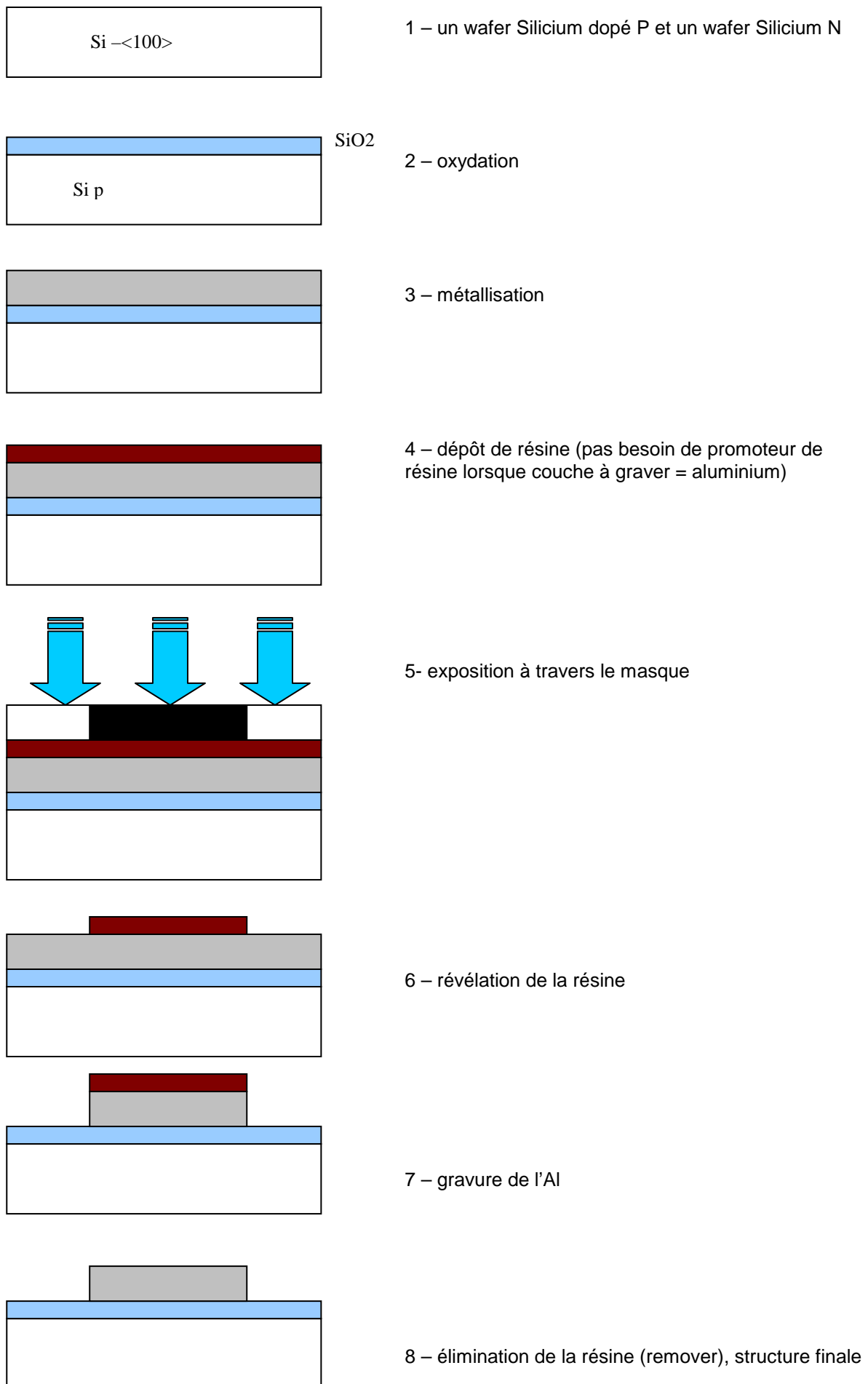
Centre Interuniversitaire de MicroElectronique et de
Nanotechnologies

Capa MOS (masques 4'' et 5'') - Organisation des séances :

2 séances sur 1 jour

<p>S1</p>	<p><i>Sur plaques vierges :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nettoyage des plaques ▪ Chargement dans four pour réalisation de l'oxyde mince (oxydation sèche 20min) ▪ Mise sous vide pour métallisation Al
<p>S2</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dépôt Al ▪ Photolithographie de l'Al ▪ Gravure humide de l'Al ▪ RIE face arrière pour enlever l'oxyde

CAPA PROCESS FLOW



OBJECTIF DU TP

L'objectif de ce travail pratique est double:

- une prise de contact avec les technologies de la micro-électronique en salle blanche, et les contraintes qui s'y rattachent (notamment de propreté).
- une prise de conscience de l'importance de l'instrumentation et des matériaux en micro-électronique.

Cet objectif se réalisera au travers de la réalisation et l'étude des éléments d'une structure simple, une capacité MOS (voir page suivante).

REMARQUES PRELIMINAIRES IMPORTANTES

Précautions à respecter en salle blanche:

La quasi totalité du TP se déroulera en salle blanche, milieu dans lequel la chasse est faite aux poussières (classe 100 = 100 particules/pied³ > 0,5 microns, soit 2700 particules/m³, voir annexe I) et où une grande rigueur est de mise:

- tenue spéciale obligatoire (avec les cheveux entièrement enfermés par la coiffe) à revêtir dans le sas. Les gants doivent être revêtus dès l'entrée dans la première salle.
- une très grande propreté et un très grand soin, indispensables pour la réalisation de structures micro-électroniques
- travailler avec beaucoup de rigueur, d'une manière posée et réfléchie en sachant toujours où se situe, dans la succession des opérations, celle que l'on est en train d'accomplir.
- ne **JAMAIS** saisir les plaquettes de silicium directement avec les doigts (même gantés), **TOUJOURS AVEC LES PINCES**
- attention à certains produits qui sont dangereux (port de lunettes obligatoire)
- flacons non utilisés toujours fermés, rinçage soigné des récipients après usage, saisir les flacons par le corps et non pas par le bouchon
- au moindre doute, s'arrêter et demander conseil

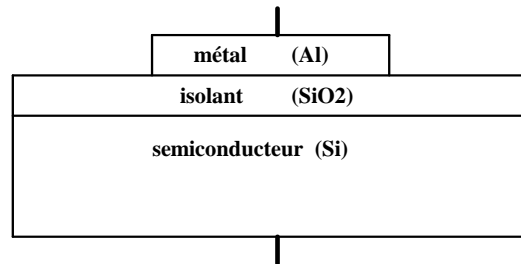
- Les étudiants peuvent entrer en salle blanche avec un **stylo bille** (les crayons papier, feutres...sont formellement interdits).
- Du papier « spécial salle blanche » est disponible à l'intérieur afin que les étudiants, s'ils le souhaitent, puissent prendre des notes.
- Il est interdit d'entrer des feuilles de papiers, des fascicules ou documents imprimés sur du papier standard ; les énoncés de TP ne seront tolérés que s'ils sont insérés dans des porte-folios ou chemises plastiques, page par page.
- Pour des mesures d'hygiène et de sécurité, la **procédure d'habillage dans le SAS d'entrée** doit être respectée :
 - 1) entrer dans le SAS et marcher sur les sols autocollants blancs afin d'enlever la poussière des semelles,
 - 2) prendre ensuite des sur-chausses et s'asseoir sur le banc afin de les enfiler **puis** franchir le banc et passer de l'autre côté (en veillant à ne pas remarcher sur les sols autocollants avec les sur-chausses au pied !),
 - 3) mettre une charlotte (coiffe) en prenant soin de placer tous les cheveux sous celle-ci,
 - 4) mettre un masque, puis des gants,
 - 5) prendre ensuite une combinaison à sa taille, la mettre (veiller à bien la fermer, jusqu'au pression sous le cou) puis mettre une paire de bottes. Bien vérifier que, lors de l'utilisation des fermetures éclair les gants n'ont pas été troués. Si c'est le cas, les changer.
- Travailler avec beaucoup de rigueur, d'une manière posée et réfléchiée en sachant toujours où se situe, dans la succession des opérations, celle que l'on est en train d'accomplir.
- Attention à certains produits qui sont dangereux (port de lunettes obligatoire) : ne pas s'appuyer sur les paillasses.
- Les flacons qui ne sont plus utilisés doivent toujours être fermés.
- Rinçage soigné des récipients après usage (pour rincer un bécher ou une éprouvette, le remplir à moitié, puis le vider lentement avec un mouvement tournant, répéter trois fois) En fin d'opération, ranger le panier dans son bécher et nettoyer soigneusement la paillasse.
- Saisir les flacons par le corps et non pas par le bouchon.
- Soyez **calmes**, ayez des gestes **lents et précis**. Au moindre doute, s'arrêter et demander conseil.
- Maintenir les plaquettes sous flux laminaire et éviter les manipulations à "quatre mains". Transportez les plaquettes d'une salle à l'autre dans leur boîte fermée.
- Porter des gants et des lunettes de protection pour toute opération comportant la manipulation des produits dangereux suivants :
 - HF, H₂SO₄, H₃PO₄, HNO₃, KOH,
 - mélange d'attaque du SiO₂,
 - mélange d'attaque de l'aluminium.

Il est vivement conseillé de consulter la fiche sécurité de chaque produit chimique (dangereux) utilisé et disponible sur le site de l'INRS www.inrs.fr

- Deux pharmacies murales de premier secours se trouve en salle blanche, près du poste de secours.
- Chaque mélange doit être effectué à l'aide de l'éprouvette étiquetée, dans le bécher étiqueté ; seul le panier qui se trouve dans ce bécher peut être utilisé. Ne pas mélanger les paniers.
- Les paniers en quartz doivent être posés sur le papier absorbant disponible, et non pas directement sur la paillasse, **SAUF** pour H₂SO₄ (risque de combustion du papier).
- Penser à vous hydrater régulièrement : présence d'une fontaine d'eau en salle blanche.

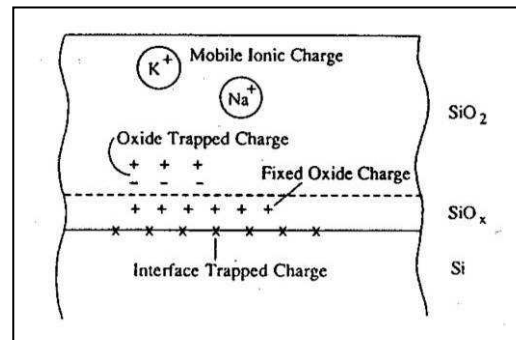
LA CAPACITE MOS

La capacité MOS entre dans la composition des éléments de type MOS, comme les transistors à effet de champ ou les capacités. Elle est également utilisée dans des dispositifs plus particuliers tels que les détecteurs CCD (charge-coupled-device: dispositif à transfert de charge) ou les mémoires électriques.



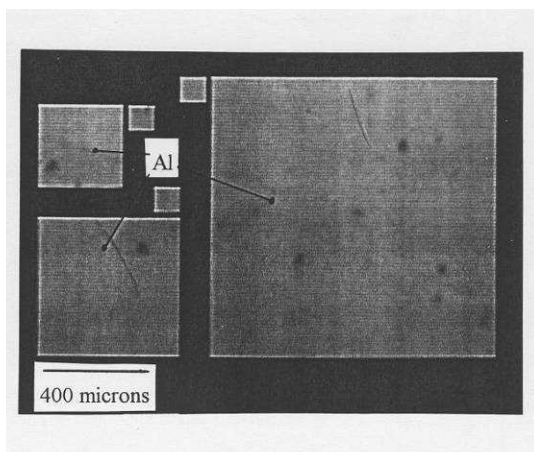
Cette capacité est généralement réalisée en interposant une couche mince de silice SiO_2 (isolante, amorphe, épaisseur qqes 10 nm) entre un semi-conducteur (silicium) et une électrode métallique (aluminium par exemple). Les caractéristiques électriques de cette structure sont détaillées dans le paragraphe IX.

Ces caractéristiques dépendent fortement de la qualité des constituants: la silice SiO_2 et les interfaces Si/SiO_2 et $\text{SiO}_2/\text{métal}$. Des charges fixes peuvent par exemple exister à l'interface Si/SiO_2 , dues aux liaisons "pendantes" sur le Si présentes à l'interface entre le Si cristallisé et la silice SiO_2 amorphe et dans l'oxyde près de cette interface (figure).



Des charges peuvent également être présentes à l'intérieur même de l'oxyde (dues aux impuretés alcalines ionisées). Le comportement électrique s'en trouve affecté. Un oxyde mince de bonne qualité peut être réalisé par oxydation thermique sèche du silicium suivant une procédure optimisée. C'est ce qui sera fait ici. La métallisation sera quant à elle réalisée par dépôt d'aluminium, couramment utilisé en micro-électronique mais souvent remplacée dans certains cas par du polysilicium dopé ou bien des siliciures métalliques. Une lithographie permettra ensuite d'obtenir des géométries différentes de structure MOS.

L'un des deux motifs ci-dessous sera réalisé en TP :



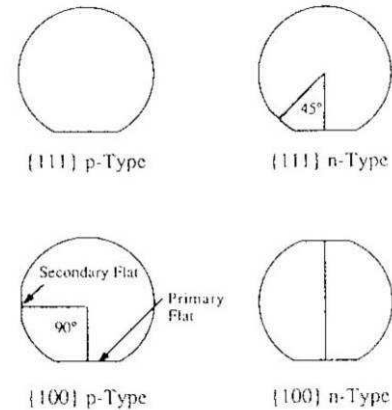
- Motifs du masque, taille des capas :
- Contact = carré de $100\mu\text{m}$ de côté
 - Grand carré = 1mm de côté
 - Moyen carré = $500\mu\text{m}$ de côté
 - Petit carré = $3000\mu\text{m}$ de côté

LES SUBSTRATS DE SILICIUM

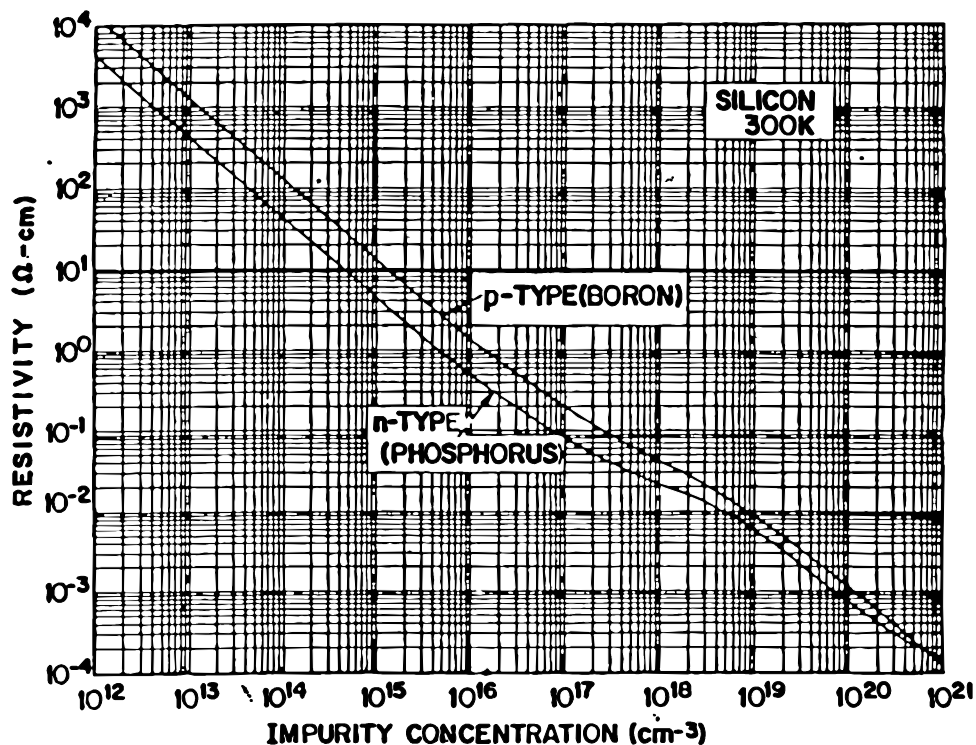
Les plaquettes de silicium sont définies par :

- leur diamètre en pouces (1pouce = 2,54 cm)
- leur type (p ou n), le dopant (bore, phosphore ou parfois arsenic)
- leur orientation cristalline ($\langle 100 \rangle$ ou $\langle 111 \rangle$) indiqué par un ou deux méplats
- leur résistivité (de l'ordre de 0,5 à 10 $\Omega \cdot \text{cm}$), fonction du dopage (figure).

Dans notre cas, il s'agit de substrats de type p avec une orientation cristalline $\langle 100 \rangle$.



Les plaquettes comportent une face polie optique sur laquelle est réalisée le circuit et une face dépolie sur laquelle on peut inscrire des indications à l'aide d'un diamant (numérotation des plaquettes). Les plaquettes sont fragiles (épaisseur 300 μm) et chères (50F pièce). On les manipulera par conséquent avec la plus grande précaution, ET TOUJOURS AVEC LES PINCES.



Evolution de la résistivité du silicium en fonction du dopage

**REALISATION ET ETUDE D'UNE CAPACITE MOS
LES POSTES DE TRAVAIL**

Elaboration

de la structure MOS: première partie

- I - Nettoyage.....p. 5
- II - Oxydation ou CVD.....p. 6

Caractérisations

- III - Ellipsométrie et Alpha-step.....p. 11
- IV - Mesures électriques 4 pointes et inductives.....p. 13

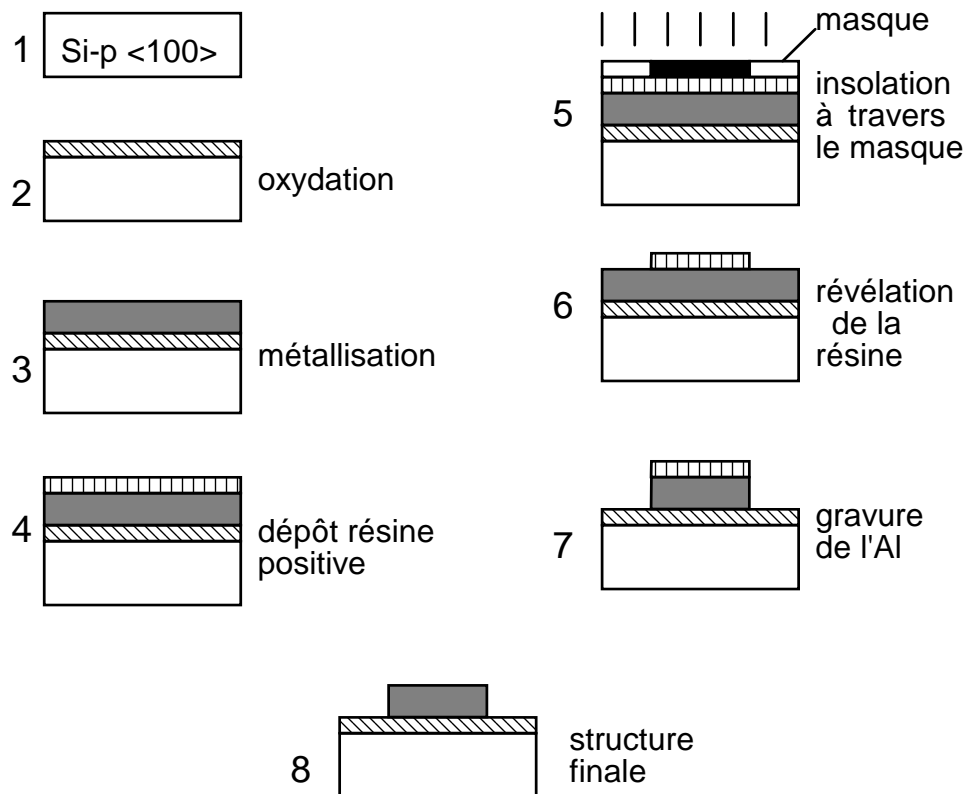
Elaboration de la structure: deuxième partie

- VI - Métallisationp. 19
- VII - Photolithographie.....p. 21
- VIII - Gravure.....p. 24

Caractérisations finales

- IX - Caractérisations C(V).....p. 28
- Annexesp.30

LES ETAPES DE REALISATION DE LA CAPACITE MOS



I - NETTOYAGE DU SILICIUM

DEGRAISSAGE ET DECAPAGE DE L'OXYDE NATIF

L'IMPORTANT DU NETTOYAGE

Ce nettoyage est garant de la qualité de la future interface Si-SiO₂. Il se fait en trois étapes:

- A - élimination de l'oxyde natif
- B - oxydation de la surface
- C - élimination de l'oxyde formé en B.

On retrouve ainsi une surface de silicium "fraîche" et propre.

MISE EN OEUVRE

- repérer tout le matériel nécessaire et par précaution effectuer un rinçage préalable des récipients à l'aide de l'eau désionisée
- sortir le bain de HF dilué (environ 5% et en verser 320 cc dans le bécher téflon prévu à cet effet **QU'ON PLACERA DANS L'EVIER**. Rincer l'éprouvette (remplir moitié d'eau désionisée et vider en tournant, ceci 3 fois)
- préparer le mélange H₂SO₄-H₂O₂ en proportion 1/1 en versant **TRES LENTEMENT** 160 cc de H₂SO₄ dans 160 cc de H₂O₂, ceci dans le bécher téflon prévu à cet effet **QU'ON PLACERA DANS L'EVIER**
- A - attaque HF dilué (5s)**, agiter (rotation et mouvement vertical), observer le mouillage de la plaquette et rinçage (vidanger 3 fois le bac à débit rapide). Réserver le mélange.
- B - attaque H₂SO₄-H₂O₂ (15min)** et rinçage (vidanger 3 fois le bac à débit rapide).
- C - attaque HF dilué (5s)** avec la solution précédemment utilisée (observer le mouillage de la plaquette) et rinçage (> 17 MΩ, vidanger 3 fois le bac à débit rapide).
- séchage des plaquettes à la centrifugeuse et remise en place dans la boîte
- récupération du mélange HF (dans le flacon de récupération), nettoyage des béchers (remplir à moitié d'eau désionisée et vider en tournant, ceci 3 fois) et de la pailleuse

Procédure de rinçage:

Plonger le panier dans le bac de rinçage en mettant en route la circulation d'eau DI ; un résistivimètre permet de contrôler la pureté de l'eau (ions). L'eau de rinçage est considérée comme suffisamment propre lorsque sa résistivité atteint 17-18 MΩ. On considérera que le rinçage sera effectué suffisamment longtemps lorsque cette valeur sera dépassée.

II - OXYDATION DU SILICIUM

Introduction

L'objectif est de créer à la surface du silicium un oxyde (SiO_2) qui sera utilisé ici comme isolant diélectrique (capacité MOS).

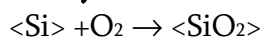
L'oxydation du silicium peut être effectuée de plusieurs manières :

- à **haute température (de 700 à 1250°C) en présence d'un courant gazeux oxydant (oxyde thermique)**,
- à **basse température par dépôt chimique en phase vapeur CVD (oxyde déposé)**.

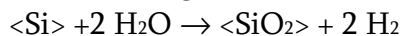
Principe de l'oxydation thermique (à haute température):

On forme une couche de silice SiO_2 à la surface de la plaquette de silicium par oxydation dans un four à haute température parcouru par un courant gazeux oxydant. On distingue deux types d'oxydation selon la nature de l'oxydant :

- **l'oxydation sèche** est réalisée en présence d'un courant gazeux d'oxygène sec, selon :



- **l'oxydation humide**, beaucoup plus rapide, où le courant d'oxygène est chargé en vapeur d'eau qui réagit aussi avec le Si suivant:



Au cours de l'oxydation, il y a consommation de Si, et par conséquent l'interface Si/SiO_2 se déplace vers l'intérieur de la plaquette, pendant que la surface de l'oxyde se déplace en sens opposé. On admet en première approximation que :

$$e_{\text{Si}} = 0,44 e_{\text{Ox}}$$

e_{Si} = épaisseur de Si

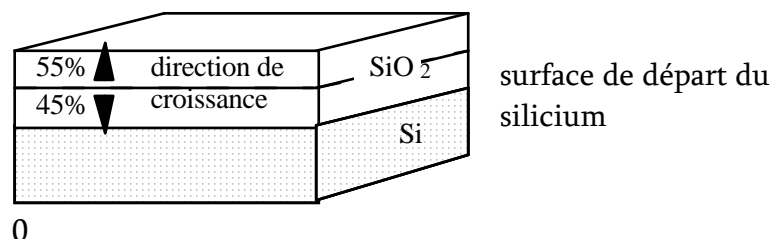
consommée

e_{Ox} = épaisseur d'oxyde formé

Pour avoir 10 nm de SiO_2

thermique, on consomme

environ 5 nm de Si.



Les températures élevées ainsi que la consommation du silicium font que l'oxydation thermique n'est pratiquée qu'au cours des premières étapes du processus technologique (oxyde épais) sous peine de modifier profondément les structures existantes.

Pour réaliser des oxydes épais, on utilisera l'oxydation humide car plus rapide. Toutefois, l'oxyde humide étant plus poreux que l'oxyde sec, ce mode d'oxydation sera suivi d'un oxyde sec de manière à densifier l'oxyde total.

De même, l'opération d'oxydation sera commencée en oxygène sec de façon à obtenir une interface Si/SiO₂ de bonne qualité.

Pour les oxydes minces, de l'ordre de quelques Angströms, l'oxygène sec donne des taux de croissance encore relativement élevés. Pour bien contrôler les faibles épaisseurs, on utilise alors l'effet de dilution de l'oxygène dans un gaz neutre, tel que l'azote ou l'argon.

Cinétique de croissance :

La cinétique d'oxydation du silicium dépend essentiellement de deux phénomènes :

- la réaction à l'interface Si/SiO₂: $\langle \text{Si} \rangle + \text{O}_2 \rightarrow \langle \text{SiO}_2 \rangle$
- la diffusion de l'oxygène à travers la couche d'oxyde déjà formée.

L'épaisseur d'oxyde formé évolue alors avec le temps suivant une loi parabolique (modèle de Deal et Grove):

$$e^2 + A.e = B.t \quad \Rightarrow \quad t = \frac{e^2}{B} + \frac{e}{B/A}$$

où e est l'épaisseur d'oxyde formé

t la durée de l'oxydation

B une constante qui caractérise la diffusion de O₂ dans SiO₂

B/A une constante qui caractérise la réaction à l'interface.

Pour les faibles épaisseurs (jusqu'à $\cong 100$ nm), là où la réaction à l'interface Si/SiO₂ prévaut, la loi de Deal et Grove surestime la durée de l'oxydation. Il est préférable dans ce cas de ne considérer que le deuxième terme de l'expression de t: $t \cong \frac{e}{B/A}$

Les paramètres B et B/A (courbes page suivante) sont liés au dopage, aux conditions de température et de pression des gaz et sont très différents selon que l'oxydation est sèche ou humide. C'est ainsi qu'à 1000°C, il faut 8h pour obtenir une épaisseur de 2000Å en oxygène sec, alors qu'une même épaisseur est obtenue en moins d'une heure en oxydation humide. Les figures (page suivante) permettent de déterminer la constante B et le rapport B/A en fonction de la température et des conditions d'oxydation.

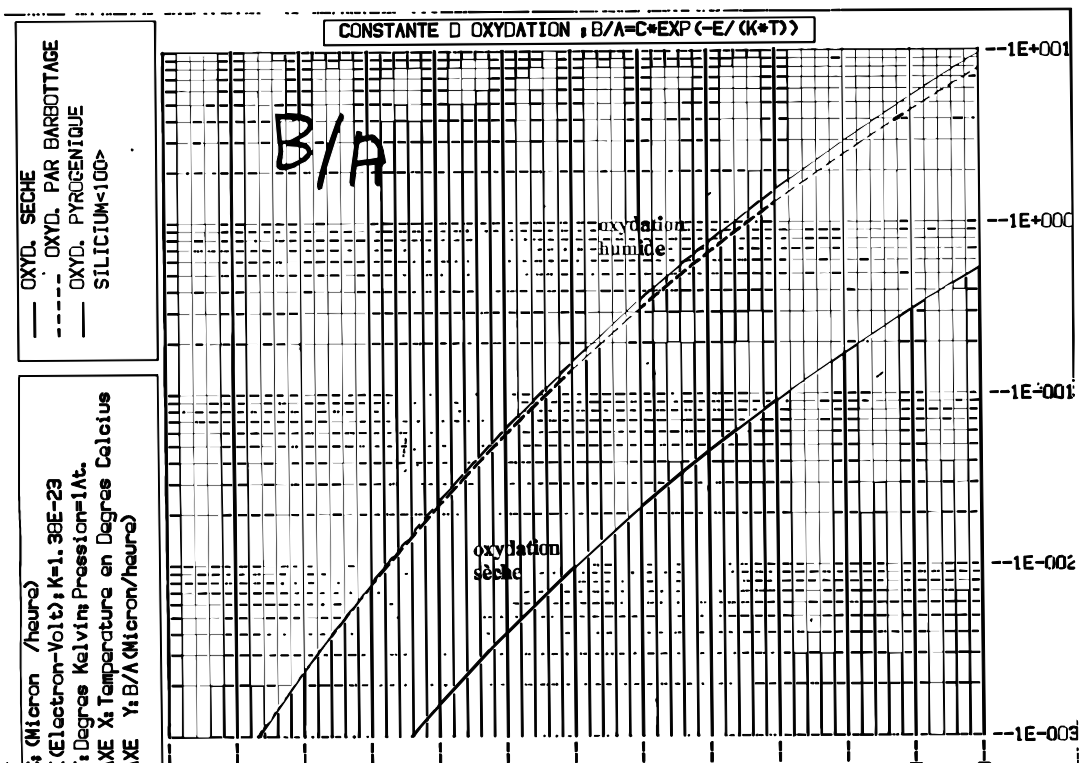
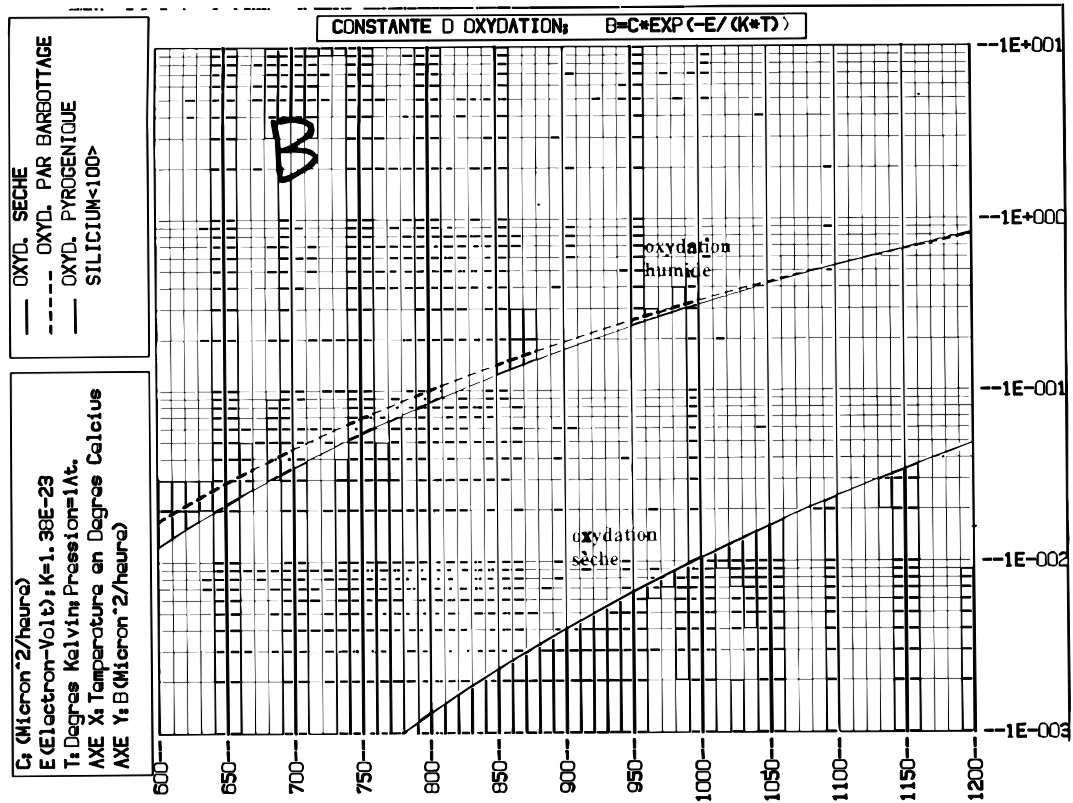
Qualité de l'interface Si/SiO₂ :

La tension de claquage de SiO₂ est de l'ordre de 12MV/cm (soit, pour une épaisseur de l'oxyde de grille de 5nm, 60V théorique). Toutefois, cette valeur n'est atteinte que si l'interface Si/SiO₂ est parfait ce qui suppose une bonne qualité « mécanique » et électrique du SiO₂ formé qui est en général fortement dépendant de la procédure de nettoyage du substrat avant l'oxydation. De plus, afin de diminuer la densité des charges à la surface, un recuit final est réalisé (10 min à 1050°C sous azote).

Contrôle de l'épaisseur :

Le contrôle de l'épaisseur d'oxyde peut être réalisé par différentes méthodes, telles que l'Alpha-step ou l'ellipsométrie. Une première indication de l'épaisseur est donnée par la couleur réfléchiée par la plaquette de silicium recouverte de silice, éclairée et observée en lumière blanche sous incidence normale (cf. tableau).

Couleur	Epaisseur (en microns)			
Gris	0,01			
Brun	0,05			
Bleu	0,08			
Violet	0,10	0,28	0,46	
Bleu	0,15	0,30	0,49	0,65
Vert	0,18	0,33	0,52	0,68
Jaune	0,21	0,37	0,56	0,72
Rouge	0,25	0,44	0,62	0,75



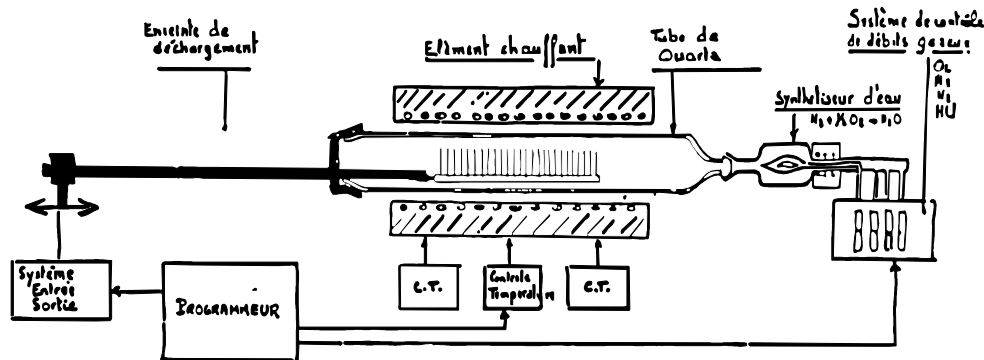
Evolutions de B et de B/A en fonction de la température pour différents types d'oxydation (pour Si 100)

B.E. Deal and Grove, Journal of Applied Physics, Vol. 36, page 3770 (1965)

MISE EN OEUVRE DE L'OXYDATION

L'oxydation est réalisée à l'aide d'une installation qui permet de soumettre les plaquettes à un cycle de température sous atmosphère contrôlée.

Le cycle thermique sous atmosphère contrôlée est étudié de manière à ce que l'oxydation se fasse dans les meilleures conditions. Ce cycle est détaillé dans le tableau ci-dessous.



L'installation d'oxydation thermique.

Le pas n° 8 (recuit sous N₂ après oxydation) permet de minimiser la densité de charges fixes qui peuvent apparaître à l'interface Si/SiO₂ (voir page 1) de même que la formation d'une barrière de diffusion SiON à la surface de l'oxyde. Cette barrière empêche la diffusion ultérieure dans l'oxyde d'impuretés telles que l'Al de l'électrode.

PAS	NOM DU PAS	DUREE DU PAS	NATURE DU GAZ	DESCRIPTION DU PAS
0000	ATTENTE		N ₂	position d'attente
0001	SOR25		N ₂	sortie du bateau
0002	<u>CHARGE</u>		N ₂	attente (le chargement se fait sur ce pas)
0003	ENT10		N ₂	entrée du bateau
0004	STAB800	5 min	N ₂	stabilisation à 800°C
0005	RAMP1050	20 min	N ₂	montée à 1050°C
0006	STAB1050	5 min	N ₂	stabilisation à 1050°C
0007	DRY	x min	O ₂	oxydation sèche à 1050°C sous O ₂
0008	ANNEAL	30 min	N ₂	recuit à 1050°C sous N ₂
0009	RAMP800	20 min	N ₂	descente à 800°C
0010	<u>ATTENTE</u>		N ₂	position d'attente
0011	SOR10		N ₂	sortie du bateau
0012	<u>DECHARGE</u>		N ₂	attente (déchargement des plaquettes)
0013	ENT25		N ₂	entrée du bateau
0014	IDLE		N ₂	programme terminé
0015	ABORT		N ₂	

L'oxydation proprement dite s'effectue dans un four à parois de quartz.

- disposition des plaquettes de travail et d'une plaquette témoin dans la nacelle en quartz
NE JAMAIS TOUCHER LA NACELLE ET LE PORTE-NACELLE AVEC AUTRE CHOSE
QUE LA "FOURCHETTE" ELLE-MEME EN QUARTZ
- définition des conditions d'oxydation à l'aide d'un automate programmable (régulation PID de la température à 1050°C)
- entrée automatique de la nacelle dans le four sous flux d'azote
- temps d'oxydation
- temps de recuit sous azote (diminution des charges fixes dans l'oxyde)
- sortie de la nacelle sous flux d'azote

TRAVAIL A EFFECTUER POUR II

- A l'aide du modèle de Deal et Grove et des abaques jointes, déterminer le temps nécessaire à la formation d'une couche de 50 nm d'oxyde à la température de 1050°C, ceci en tenant compte de la faible valeur de l'épaisseur pour l'utilisation du modèle.
- Calculer l'épaisseur de Si consommé pour former les 50 nm de SiO₂.
- Mettre en oeuvre l'oxydation

III - ELLIPSOMETRIE

L'ellipsométrie est une méthode non destructive de mesure de l'épaisseur et de l'indice de très fines couches diélectriques.

PRINCIPE:

Considérons une très fine couche de silice sur un substrat de silicium. Une onde lumineuse monochromatique plane, polarisée rectilignement, arrivant sur ce système peut être considérée comme la somme de deux composantes :

- l'onde p, parallèle au plan d'incidence,
- l'onde n, normale au plan d'incidence.

Le déphasage $\phi_p - \phi_n$ entre les deux composantes est nul.

Aux interfaces air-SiO₂ et SiO₂-Si, les coefficients de réflexion et de transmission sont différents pour les deux composantes. Il en résulte que la lumière émergente provenant des réflexions multiples sur les deux interfaces possède une polarisation elliptique. Cette polarisation est caractérisée par deux paramètres angulaires Δ et Ψ définis comme suit :

- Ψ est lié au rapport des amplitudes des ondes n et p par:

$$\Psi = \arctan\left(\frac{A_p}{A_n}\right)$$

- Δ est le déphasage entre les deux ondes n et p:

$$\Delta = \phi_p - \phi_n$$

De la mesure de Δ et Ψ , il est possible de déduire l'épaisseur e et l'indice n de la couche diélectrique.

PRATIQUE :

Pour des raisons de commodité, on préfère, pour mesurer Δ et Ψ , envoyer sur l'échantillon une lumière polarisée elliptiquement en ajustant l'orientation des axes de l'ellipse et son excentricité (déphasage Δ), de telle façon que la lumière émergente soit polarisée rectilignement. Cette disposition ne change en rien le principe de mesure, mais seulement la disposition des parties constituantes d'un ellipsomètre.

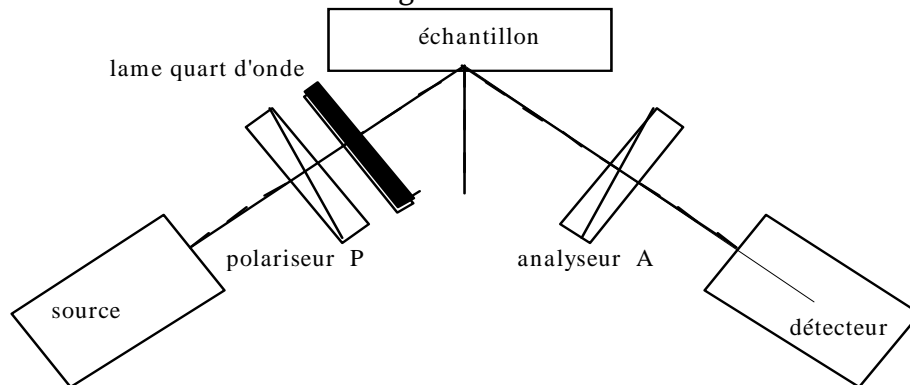
En pratique, un ellipsomètre comporte les éléments suivants :

- une source lumineuse monochromatique de longueur d'onde connue,
- un polariseur P permettant de polariser la lumière incidente selon un angle variable,
- une lame quart d'onde induisant un déphasage entre l'onde p et l'onde n de la lumière incidente (ce déphasage est ajusté en ajustant l'orientation de la lame quart d'onde par rapport au polariseur P)
- un porte échantillon,
- un analyseur A permettant d'éteindre la lumière émergente lorsqu'elle est polarisée rectilignement,
- un photomultiplicateur jouant le rôle de détecteur d'extinction.

La technique de mesure consiste à rechercher l'extinction complète de lumière émergente en agissant sur :

- l'orientation du polariseur P par rapport à la lame quart d'onde. La lumière polarisée elliptiquement qui est envoyée sur l'échantillon doit être telle que la lumière émergente soit polarisée rectilignement,
- l'orientation de l'analyseur A qui doit assurer l'extinction de la lumière émergente.

Ces deux réglages sont convergents. Il y a en principe 16 couples d'orientation (A,P) qui assurent l'extinction. Cependant, le relevé de deux d'entre eux, judicieusement choisis, permet de déterminer Δ et Ψ sans ambiguïté. Un programme d'acquisition et de traitement des données couplé à l'ellipsomètre permet alors de remonter à l'épaisseur ou/et à l'indice de la couche connaissant l'ordre de grandeur de l'une des deux valeurs.



MISE EN OEUVRE DE L'ELLIPSOMETRIE:

Placer la plaquette sur le porte-échantillon. Vérifier l'horizontalité (les deux réticules doivent coïncider dans la lunette). Ouvrir le faisceau Laser. Mettre en route le moteur qui assure la rotation de l'analyseur. L'oscillation du signal détecté doit être visible sur l'indicateur à diodes. Lancer le programme de mesure avec RUN. Entrer un numéro d'échantillon. Choisir la mesure sur un oxyde (touche K1). La mesure se fait et le résultat est imprimé:

épaisseur en Å période (indétermination de e_i) angle psi angle delta

Il est possible d'afficher aussi la liste des multiples de l'épaisseur fondamentale e_0 (c'est à dire toutes les possibilités de valeurs, compte tenu de l'indétermination). Pour cela activer la touche K8 (avec schift).

FERMER LE FAISCEAU LASER A CHAQUE CHANGEMENT D'ECHANTILLON.

TRAVAIL A EFFECTUER POUR III ETUDE OPTIQUE DE LA COUCHE D'OXYDE

On se propose d'étudier par ellipsométrie:

- un oxyde élaboré sur Si<111> dans les mêmes conditions que celles utilisées pour élaborer la capa MOS

- Mesurer par ellipsométrie la valeur de l'indice n et de l'épaisseur e de chaque échantillon.
- Afin de lever l'indétermination qui peut subsister sur la valeur de l'épaisseur pour certains échantillons, contrôler la valeur de cette épaisseur avec l'Alpha-step qui permet la mesure de hauteurs de marche. A cet effet les couches d'oxyde ont été gravées.

Au vu de ces résultats:

- tracer l'évolution de e avec la durée d'oxydation et déterminer les constantes A et B intervenant dans la loi de Deal et Grove pour une oxydation humide à la température utilisée.

IV - MESURES RESISTIVITES 4 POINTES ET INDUCTIVES

Ces mesures permettent d'accéder à la valeur de la résistivité des substrats de silicium et des couches minces. Dans le cas présent elles permettront l'étude du substrat et de la métallisation (la couche d'oxyde possède une résistivité trop élevée pour que sa mesure soit possible).

Le résultat de la mesure est donné par ce qu'on appelle la résistance carrée R_{\square} . Cette résistance est celle d'un échantillon du matériau étudié, en forme de carré de 1 cm de côté. Cette mesure suppose que l'épaisseur e de l'échantillon est constante et petite devant son étendue.

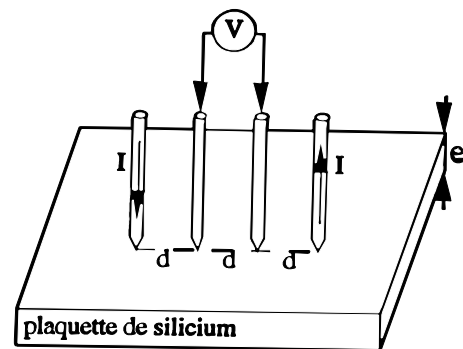


De R_{\square} on peut alors tirer la valeur de la résistivité ρ en ohm.cm, connaissant son épaisseur e :

$$\rho(\Omega.cm) = R_{\square}(\Omega).e(cm)$$

Principe de la méthode 4 pointes alignées:

Cette méthode consiste à faire passer un courant I entre les deux pointes extrêmes de quatre pointes alignées équidistantes (en général en tungstène) qui sont appliquées sur la surface de l'échantillon. La mesure de la tension aux bornes des deux pointes centrales permet de déterminer la résistance carrée R_{\square} . Un calcul électrostatique de la répartition des lignes de champ sous les pointes permet de montrer que:

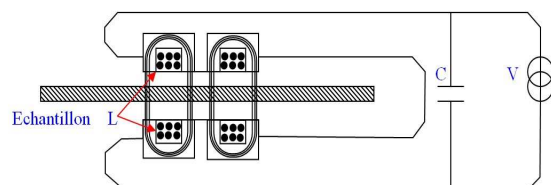


$$R_{\square} = (\pi/\ln 2)(V/I) = 4,53V/I$$

Cette méthode est applicable pour une résistivité homogène en surface et en épaisseur

Principe de la méthode inductive:

Elle utilise un circuit radiofréquence LC comportant deux bobines identiques (avec noyau en ferrite), montées en série, placées l'une en face de l'autre et espacées de quelques millimètres. L'échantillon est glissé entre ces deux bobines. Le champ magnétique haute fréquence créé entre les deux bobines induit des courants de Foucault dont la valeur dépend de la résistance de l'échantillon. De l'énergie est dissipée dans l'échantillon, le coefficient de surtension Q du circuit diminue. Une tension supplémentaire ΔV doit être appliquée pour rétablir la valeur initiale de Q . ΔV est directement proportionnelle à R_{\square} .



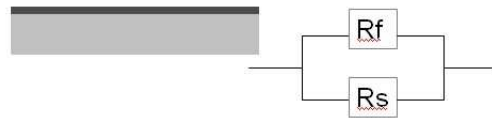
Il est important de noter que cette méthode fait une mesure de la résistance carrée sur la totalité de l'épaisseur de l'échantillon. Si sa résistivité est homogène sur toute son épaisseur, elle pourra être déterminée sans ambiguïté par:

$$\rho(\Omega.cm) = R_{\square}(\Omega).e(cm).$$

Par contre si la résistivité varie avec l'épaisseur (couche mince et substrat de résistivités différentes, ou bien gradient de concentration de dopant), de la puissance dissipée dans toute l'épaisseur de l'échantillon le système déduira la résistance carrée totale R_t de laquelle il ne sera pas toujours possible de déduire les résistivités.

- Dans le cas d'une couche mince ($R_f = R_f$) déposée sur un substrat ($R_s = R_s$) la mesure donne:

$$R_t = \frac{R_f \cdot R_s}{R_f + R_s}$$

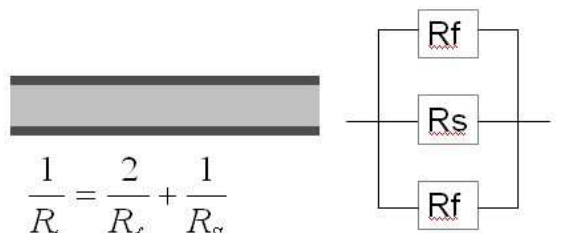


Si R_f est petit devant R_s alors $R_t \cong R_f$ et $\rho_f \cong R_t.e$.

Par contre si R_f et R_s sont comparables, seule la connaissance de R_s permettra de déterminer R_f

- Dans le cas d'un substrat dopé par diffusion (diffusion sur les deux faces) ou implanté (sur une seule face).

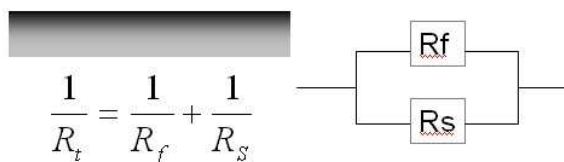
Si la diffusion ou l'implantation conduit à un dopage à peu près homogène sur la profondeur concernée par le dopage (cela peut se produire dans certaines conditions), connaissant la résistance du substrat, il sera possible d'en déduire celle des deux épaisseurs dopées par diffusion ou de l'épaisseur unique dopée par implantation.



$$\frac{1}{R_t} = \frac{2}{R_f} + \frac{1}{R_s}$$

si $R_s \gg R_f$ alors $R_t = \frac{R_f}{2}$ et $\rho_f = 2R_t.e_f$

Par contre si un gradient de concentration subsiste sur l'épaisseur du substrat, la valeur de la résistance carrée mesurée n'est plus liée d'une manière simple à la résistivité $\rho(x)$ qui présente elle-même un gradient suivant l'épaisseur.



$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_s}$$

MISE EN OEUVRE DE LA METHODE 4 POINTES :

- enlever avec précaution le capuchon protège-pointe et positionner la tête avec les pointes à environ 5 mm de la table (attention à bien bloquer la tête)
- mettre en place la plaquette sur le bord de la table (attention à ce qu'elle ne glisse pas) et la pousser délicatement sous les pointes
- après avoir vérifié le montage, mettre en marche le voltmètre et la source de courant
- afficher le courant désiré (I source, valeur, enter) et fixer la tension limite à une valeur raisonnable (V limit, valeur, enter)
- abaisser DELICATEMENT, avec le levier, la tête de mesure jusqu'à ce que les pointes viennent au contact de l'échantillon et maintenez-les en pression (elles sont montées sur ressort)
- activer la mesure (injection du courant) avec
- noter la valeur de la tension et désactiver la mesure avant de relever les pointes

Il sera nécessaire de faire au moins trois mesures avec trois valeurs différentes du courant pour vérifier l'ohmicité du contact. Pour cela on choisira les courants dans le rapport 1-10-100.

MISE EN OEUVRE DE LA METHODE INDUCTIVE :

- mettre en marche et choisir la gamme de mesure (sur l'arrière de l'appareil: Ω ou $m\Omega$)
- choisir le mode de fonctionnement: manuel ou auto
- mettre en place la plaquette sur le support ramené sur le côté droit.
- la mesure se fait au centre et en 4 points disposés en croix près du bord. En mode manuel chaque mesure est réalisée après une pression sur le bouton et la R_{\square} s'affiche (en Ω ou $m\Omega$). En mode auto les 5 mesures se réalisent automatiquement et on lit la valeur moyenne.

TRAVAIL A EFFECTUER POUR IV

Les mesures électriques seront réalisées parallèlement, avec la méthode des 4 pointes alignées et la méthode inductive. Dans le cas de la méthode des 4 pointes, il sera nécessaire, pour chaque échantillon, de s'assurer de l'ohmicité des contacts en effectuant une mesure de la résistance carrée R_{\square} avec au moins trois valeurs du courant injecté choisies dans un rapport 1-10-100.

1) - Etude du substrat utilisé pour la réalisation de la structure MOS

Mesure de la R_{\square} et calcul de la résistivité. En déduire le dopage.

2) - Substrats implantés: étude de l'influence de l'implantation et du recuit

Etude de l'évolution de la résistivité pour deux doses d'implantation différentes, avant et après recuit. Rôle du recuit? Corrélation entre les deux types de mesures sur un même échantillon. Que représentent les valeurs mesurées?

3) - Etude de la métallisation aluminium

Une fois le dépôt effectué par pulvérisation, mesure de la résistivité du dépôt d'aluminium. Comparer à la valeur du monocristal. Conclusions?

V - METALLISATION

Introduction:

L'une des dernières étapes intervenant dans le procédé de fabrication d'un circuit intégré est la métallisation. Elle consiste à déposer sur la surface de la plaquette une couche conductrice qui sera ensuite gravée pour définir les contacts et les interconnexions. La métallisation intervenant presque en fin de fabrication, à ce stade la surface de la plaquette est en général très irrégulière (de nombreuses marches d'oxyde de plusieurs milliers d'Angströms ont été introduites, des trous profonds ont aussi été réalisés pour les prises de contact). Le dépôt métallique pour recouvrir parfaitement toute la surface doit donc être relativement épais, de l'ordre de 500 à 800 nm.

Le métal utilisé doit satisfaire à un grand nombre de conditions, on peut citer:

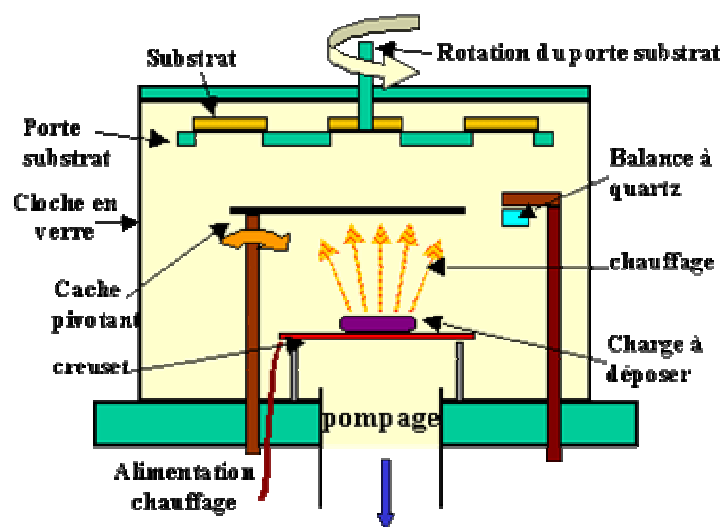
- l'ohmicité des contacts avec le silicium quel que soit son dopage,
- l'adhésion de la couche de métal sur le silicium ou sur la silice, même après gravure,
- le métal doit pouvoir être facilement gravé par les procédés courants de lithographie,
- les irrégularités du circuit doivent pouvoir être recouvertes sans discontinuité ,
- un bon compromis coût de revient / conductivité électrique.

Le métal qui offre le meilleur compromis entre ces différentes exigences est l'aluminium ($\rho = 2,7m\Omega.cm$ à 300K). **C'est un dopant de type P pour le silicium. Il forme un contact ohmique avec le silicium P pour tous les niveaux de dopage. Il forme également un contact ohmique avec le silicium N pour des dopages supérieurs à $3.10^{19}/cm^3$.**

Dans le cas présent le dépôt d'Al servira d'électrode pour la capacité MOS et se fera par évaporation par effet joule.

EVAPORATION SOUS VIDE

Principe :



Cette opération est effectuée dans un bâti d'évaporation dans lequel on réalise un vide de l'ordre de 10^{-6} Torr. Le métal à évaporer est placé dans un creuset (souvent en Tungstène, la

température de fusion de celui-ci étant supérieure à la température d'évaporation de l'aluminium), qui est chauffé par effet Joule. L'énergie fournie permet ainsi de convertir le métal de sa phase condensée à sa phase vapeur (il faut atteindre une température d'environ 1000°C pour une pression de 10^{-4} Torr). L'évaporation se fait dans toutes les directions : lorsque les

atomes arrivent sur des surfaces froides (parois de l'enceinte, plaquettes de Si), ils vont se condenser et former un film stable si les paramètres d'évaporation sont correctement choisis (température des substrats, vitesse des particules : température et pression dans l'enceinte...). Un cache que l'on peut actionner par air comprimé permet de ne mettre en contact les substrats et les molécules évaporées, que lorsque l'évaporation est devenue uniforme. L'uniformité du dépôt est obtenue en disposant les plaquettes sur un support animé d'un mouvement de rotation planétaire autour de la source d'évaporation.

Le contrôle de l'épaisseur du métal déposé et de la vitesse de dépôt est réalisé au moyen d'un quartz piézoélectrique dont la fréquence propre d'oscillation est fonction de sa masse et donc de l'épaisseur d'aluminium déposée dessus. Le principe de la balance à quartz consiste à détecter la dérive de la fréquence d'oscillation du quartz par la modification de sa masse lors de la croissance de la couche déposée (le dépôt s'effectue aussi sur le quartz). C'est donc une mesure électrique qu'il faut bien évidemment étalonner. A chaque début d'expérience, la fréquence de référence est redéfinie. En mesurant le décalage de fréquence en fonction du temps, on peut aussi déterminer la vitesse de croissance des couches déposées :

Formule de SAUERBREY

$$\Delta f = \frac{-2\Delta m f_0^2}{A\sqrt{\rho_q \mu_q}}$$

où f_0 est la fréquence de résonance intrinsèque du cristal, A la surface active du cristal (entre les électrodes), ρ_q la densité du quartz et μ_q le module de cisaillement du quartz.

Le quartz doit être maintenu à température constante pour éviter la dérive de sa fréquence de résonance avec la température, c'est pour cela qu'il est refroidi par circulation d'eau.

L'avantage de la technique de dépôt par évaporation sur la technique de dépôt par pulvérisation est une contamination limitée étant donné le niveau de vide obtenu ($\sim 10^{-7}$ mbar).

Les inconvénients liés à cette technique sont :

- la contamination potentielle par la nacelle elle-même,
- l'impossibilité d'évaporer des métaux à haute température de fusion,
- la limite sur l'épaisseur de la couche déposée étant donnée la faible quantité de métal pouvant être déposée dans la nacelle.

CONSIDERATIONS GENERALES SUR LA PULVERISATION CATHODIQUE :

La pulvérisation cathodique est un procédé de dépôt sous vide. Dans une enceinte sous vide (pression de l'ordre de 10^{-2} torr) un plasma est développé entre deux électrodes, à partir d'un gaz neutre tel que l'argon.

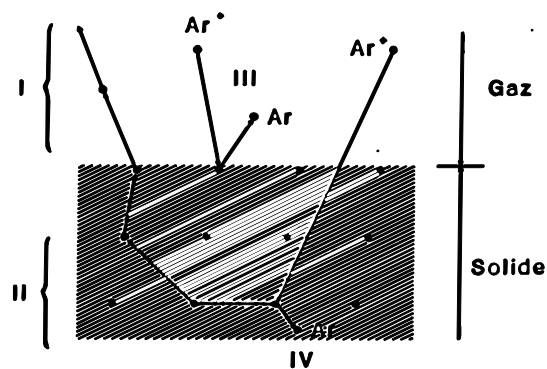
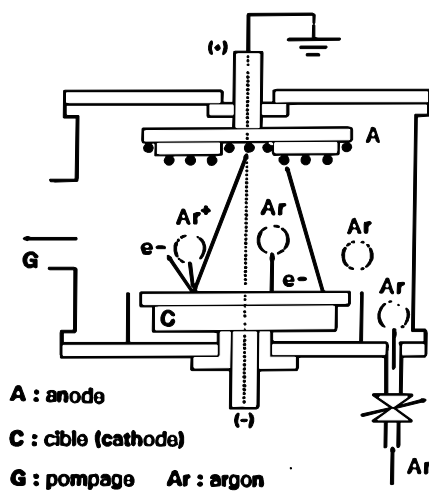
- L'une des électrodes est portée à un potentiel négatif (**cathode** à quelques kilovolts), il s'agit de la **cible** du métal que l'on souhaite déposer.

- La seconde est reliée à la masse et supporte les **substrats** à métalliser (**anode**).

Dans le plasma créé, les ions positifs Ar^+ sont accélérés sous une tension de quelques kilovolts et irradient la surface de la cible. Les ions incidents pénètrent sur une profondeur de l'ordre de quelques nm.

L'interaction de ces ions avec la matière peut se faire suivant plusieurs processus. Dans cette gamme d'énergie (quelques keV) le processus qui est favorisé c'est celui de l'interaction de l'ion avec l'ensemble de l'atome auquel l'ion transfère une quantité d'énergie qui peut être suffisante pour que l'atome soit éjecté de son site. Si cette éjection est réalisée suffisamment près de la surface (sur une profondeur de l'ordre de 1 nm) l'atome éjecté de son site peut sortir de la cible. C'est le phénomène de pulvérisation. A noter que cette pulvérisation, favorisée ici par de faibles énergies, est négligeable lorsqu'on fait de l'implantation à 100 keV et au-delà.

Les atomes pulvérisés se condensent sur les échantillons placés sur l'anode (et aussi sur les parois de l'enceinte). Les valeurs typiques de vitesses de dépôt sont de l'ordre de quelques centaines d'Angströms par minute.



I expulsion d'atomes **II** collision ion-atome
III rétrodiffusion d'ions **IV** absorption d'ions

III rétrodiffusion d'ions **IV** absorption d'ions

L'avantage de cette méthode par rapport à l'évaporation sous vide est double :

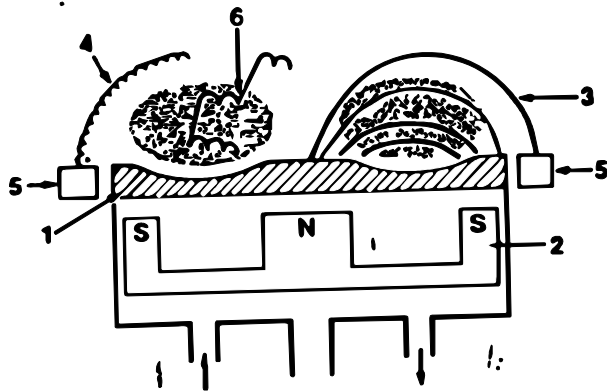
- elle permet de déposer tous les matériaux, simples ou composés, réfractaires ou non, conducteurs ou diélectriques sur tous les types de substrats qui acceptent une mise sous vide et un léger échauffement;

- L'énergie des particules pulvérisées est nettement plus élevée que dans le cas de l'évaporation: $\cong 10$ eV. L'adhérence de la couche sur le substrat s'en trouve améliorée.

L'inconvénient majeur de la pulvérisation cathodique est d'être une technique agressive : une partie des atomes expulsés de la cible possèdent une énergie supérieure à 10eV; cette énergie peut être suffisante pour endommager la surface des échantillons.

Intérêt de l'utilisation d'une cathode "magnétron" (pulvérisation cathodique magnétron):

Les électrons émis par la cathode sous l'effet du bombardement ionique sont confinés au voisinage de la surface de la cathode par un champ magnétique créé par les aimants situés sur la face arrière. Il en résulte une augmentation de la probabilité de collision avec les atomes et donc d'ionisation. On augmente ainsi l'intensité de la pulvérisation.



Pulvérisation magnétron:

(1) cible. (2) aimants. (3) lignes de champ. (4) électrons. (5) anode. (6) collision e⁻-atomes

MISE EN OEUVRE DE LA PULVERISATION CATHODIQUE :

Une cathode en aluminium est bombardée par des ions argon. Les atomes d'aluminium ainsi expulsés viennent se déposer sur le substrat.

- mise en route du groupe Plassys (clé ON et interrupteur d'alimentation DC 3000 ON)
- ventiler la cloche (Vent dans Pump Control)
- chargement des plaquettes (substrate loader), fermeture de la cloche
- pompage (pump) primaire puis cryogénique
- étape de prépulvé (programme Al-pre en dynamic/single dans top level)
- étape de métallisation (programme Al-s-tp en statique pour chaque porte-substrat sélectionné)
- arrêt puis ventilation, ouvrir la cloche et récupérer les plaques (substrate loader)
- remettre le pompage en route.

TRAVAIL A EFFECTUER POUR V

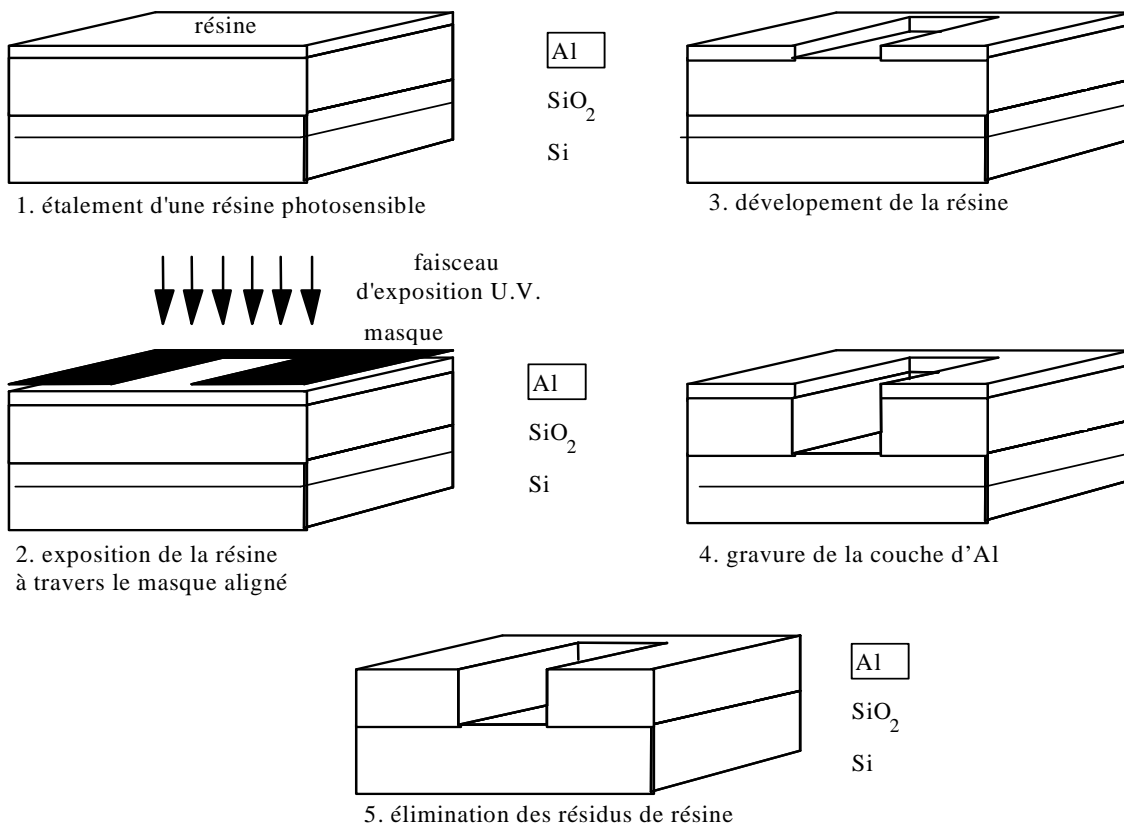
Effectuer un dépôt d'aluminium d'environ 400 nm d'épaisseur.

VI - PHOTOLITHOGRAPHIE

La photolithographie est l'opération qui consiste à graver selon un certain motif une couche mince d'un matériau donné. Le motif à graver se trouve initialement (en positif ou en négatif) sur un support appelé masque. **Il s'agit d'une plaque de verre** comportant une couche de chrome ou de gélatine sur laquelle a été gravée le motif que l'on veut reproduire. L'élaboration d'un circuit nécessite en général plusieurs niveaux de masquage, permettant de définir successivement les zones associées à chaque élément de la structure: zone diffusée, régions d'oxyde mince, prises de contact et interconnexions. Le positionnement des masques successifs doit donc se faire avec un alignement rigoureux entre les différents niveaux de masquage.

Dans le cas très simple d'une structure de capacité MOS isolée, un seul niveau de masquage intervient (gravure des électrodes d'aluminium). Il n'y a donc pas de procédure d'alignement à effectuer, procédure toujours délicate à réaliser avec perfection.

Le procédé de photolithographie se déroule selon les séquences suivantes :



0

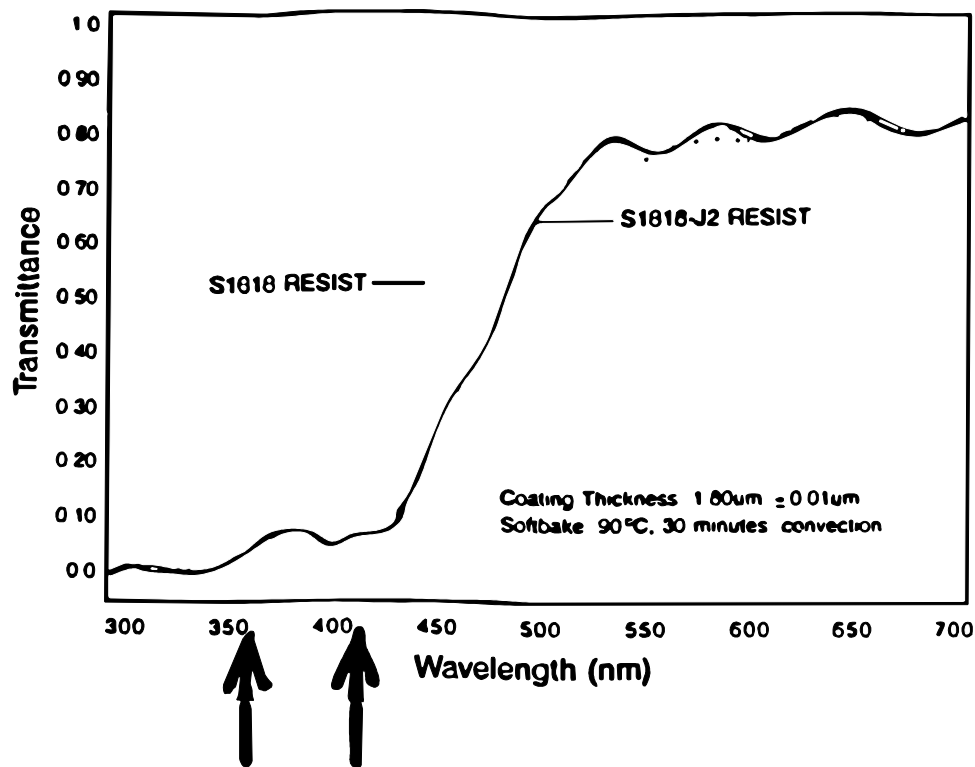
ÉTALEMENT D'UNE RESINE PHOTOSENSIBLE sur la couche à graver par centrifugation. La plaquette est plaquée par aspiration sous vide sur un support tournant (à environ 4000t/min); quelques gouttes de résine sont déposées au centre ; la force centrifuge étale la résine en un film ayant une épaisseur de l'ordre du micron suivant la fluidité de la résine.

SECHAGE DE LA RESINE : 3 min sur une plaque chauffante à 120°C.

EXPOSITION DE LA RESINE A UN RAYONNEMENT U.V. (lampe à vapeur de mercure) à travers le masque à reproduire. La résine est exposée à l'ensemble du spectre d'émission du Hg mais elle est sensibilisée par deux longueurs d'onde du spectre du Hg, situées dans l'ultraviolet:

- 405 nm avec une intensité de 10 milliwatts/cm²
- 365 nm avec une intensité de 5,3 milliwatts/cm²

Le mécanisme de sensibilisation est basé sur l'absorption du rayonnement UV (figure) qui modifie la structure des molécules organiques et permet ainsi l'attaque chimique. Les deux flèches indiquent la longueur d'onde des raies ultraviolettes de la lampe utilisées pour la lithographie



Au cas où un alignement est à effectuer:

- Avant d'effectuer l'exposition, il faut procéder à l'**alignement du masque** à reproduire par rapport aux motifs déjà existant sur la plaquette de façon extrêmement précise. Ceci est réalisé grâce à une machine d'alignement qui permet de mouvoir la plaquette par rapport au masque dans les deux directions x, y et en rotation. Cet alignement est facilité en plaçant sur les différents niveaux de masquage des croix d'alignement. Il n'y aura pas d'alignement à faire ici (un seul niveau de litho)

- Pour éviter les phénomènes de diffraction à travers les motifs de petite dimension, lorsque l'alignement est jugé correct, on met en **contact optique** le masque et la plaquette (la couche de chrome contre la plaquette), ce qui assure un transfert de l'image avec un maximum de précision lors de l'insolation. Le masquage par contact avec une lumière U.V. (longueur d'onde de 0,3 à 0,4 μm) permet ainsi d'avoir une résolution de 0,3 à 0,5 μm sur les motifs à reproduire.

DEVELOPPEMENT : la plaquette est placée dans un bain de développement (à base de soude) qui va dissoudre la résine insolée (résine positive) ou non insolée (résine négative). On reproduit de cette façon les motifs du masque mère sur la résine. La concentration du développeur ainsi que le temps de trempage dépend du type de résine utilisée. Les plaquettes sont ensuite rincées et séchées.

CONTROLE VISUEL (au microscope) des motifs développés.

DURCISSEMENT DE LA RESINE (polymérisation) : 3 min sur une plaque chauffante à 120°C.

ATTAQUE DE LA COUCHE A GRAVER dans les régions non protégées par la résine.

ELIMINATION DES RESIDUS DE RESINE de manière chimique (dans un bain de remover) ou à l'aide d'un plasma oxygène. La plaquette est alors prête pour une autre étape.

MISE EN OEUVRE DE LA LITHOGRAPHIE :

> Préparation de la paillasse

- Mise en route de la plaque chauffante (120°C)
- Préparer le développeur (300 cc dans le bécher), placer 2 kimwipes sur la paillasse

-> Mise en place du masque à photolithographier

- mise en service de la machine d'alignement Karl-Suss [ouvrir les vannes au mur (air, vide azote), lampe UV à vapeur de mercure, général-pression-lampe microscope sur la machine]

Bien repérer le fonctionnement du mécanisme de mise en contact plaquette-masque et de retrait (les 2 manettes sur le côté gauche)

- brancher le porte-masque adapté au tuyau d'aspiration et mettre en place le **masque (chrome vers le haut)**, nettoyage à l'aide de la soufflette, mise en place du porte masque sur la platine du microscope
- observation des motifs du masque avec le microscope de la machine d'alignement (2 objectifs)

Il n'y aura pas d'alignement à faire ici (1 seul niveau de masquage)

- Vérifier la cohérence entre les paramètres relatifs à nature de la résine, son étalement et son insolation, à savoir pour la résine dont on dispose:
 - la vitesse de rotation de la tournette et son accélération
 - la durée de la rotation
 - la puissance des 2 longueurs d'onde utilisées sur le mercure pour l'insolation
 - la durée de l'insolation

-> Dépôt de résine photosensible

- Sortir les plaquettes de la boîte et les poser sur le kimwipe
- mise en place de la plaquette sur la tournette (au besoin en s'aidant d'une deuxième pince), vérifier son centrage, vérifier le réglage de la tournette (rotation **4000 t/min** pendant **30 sec** avec accélération à **3000 t/s²**), se vérifie avec ENTER activé +sieurs fois
- (Pour SiO₂: étalement du promoteur d'adhérence (sur SiO₂) en rotation)
- Effectuer un premier cycle de rotation sans résine en donnant un coup de soufflette
- une fois à l'arrêt, dépôt de 5 à 6 gouttes de résine au centre de la plaquette (recouvrement à 80%) puis étalement par rotation (temporisation automatique)

>- Séchage de la résine

sur plaque chauffante **120°C, 3 min**

>- Insolation de la résine

- mise en place de la plaquette sur le support (côté droit) méplat vertical
- **vérifier qu'on est bien en position désengagée** (2 manettes sur côté gauche)
- amener avec douceur la plaquette sous le masque et l'amener au contact (grosse manette à gauche) puis séparation ** microns (petite manette à gauche)
- (- selon les cas: alignement du masque avec les motifs présents sur la plaquette)
- mettre en contact (petite manette repoussée côté gauche) et insolation (5 à 14s suivant la machine: 6 sec avec 10 mW et 5,6 mW sur 365 et 405 nm)

>- Développement de la résine, rinçage et séchage

- développement de la résine (**1 min**) de façon à éliminer les zones insolées
- récupérer le développeur dans le même flacon
- rinçage (bac grand débit puis bac petit débit)
- séchage à la centrifugeuse (autre salle) (transport des plaques jusqu'à celle-ci dans le bac de rinçage à moitié rempli d'eau et retour des plaques **dans la boîte**)

>- Durcissement de la résine

- sur plaque chauffante **120°C, 3 min**
- contrôle visuel des motifs au microscope.

GRAVURE SECHE

La technique de gravure par plasma utilise une décharge lumineuse établie à faible pression (10^{-2} à 1 torr) pour générer des espèces chimiquement actives à partir d'un gaz; ces espèces se combinent avec la couche à graver pour former des composés volatils évacués par le système de pompage.

Le principe de gravure ionique consiste à utiliser des faisceaux d'ions dirigés vers la cible à traiter. Si les ions possèdent une énergie importante et sont chimiquement inactifs (par exemple l'argon), il y a abrasion ionique. La gravure résultante est verticale (anisotropie importante) mais sans sélectivité. En outre, les déchets de gravure peuvent retomber sur la cible.

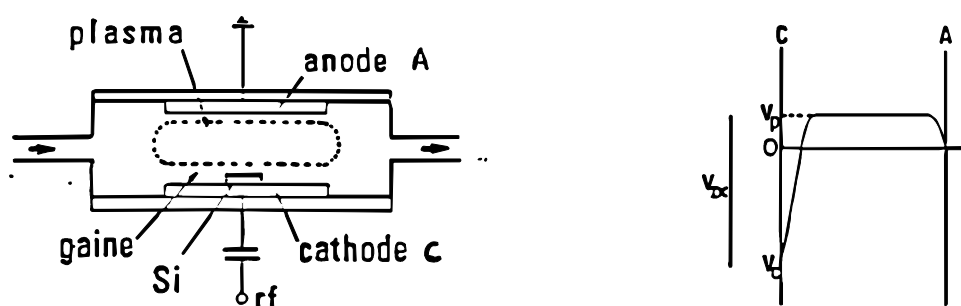
La combinaison des systèmes à plasma avec la gravure ionique a conduit à la **gravure ionique réactive (RIE Reactive Ion Etching)**. De cette manière, on associe le mécanisme chimique (plasma) à l'origine de la sélectivité de la couche à graver et le mécanisme physique (abrasion ionique) induisant l'anisotropie.

La gravure ionique réactive s'opère dans un réacteur à plasma à électrodes parallèles dont l'une est reliée électriquement au substrat, ce qui augmente le nombre d'ions à direction normale à la surface, entraînant donc une anisotropie élevée sans perte notable de la sélectivité.

Il faut cependant noter que si le principal avantage de la gravure sèche est l'anisotropie de l'attaque tout en gardant une forte sélectivité par un choix judicieux du gaz de réaction, certains inconvénients nouveaux apparaissent : les énergies mises en jeu peuvent provoquer des défauts à la surface des plaquettes ou des températures élevées. Par ailleurs, il y a toujours une consommation plus ou moins importante de la résine protectrice car la sélectivité n'est jamais parfaite, ce qui entraîne des contraintes d'épaisseur pas toujours compatibles avec les nécessités de la lithographie.

Principe de la gravure ionique réactive:

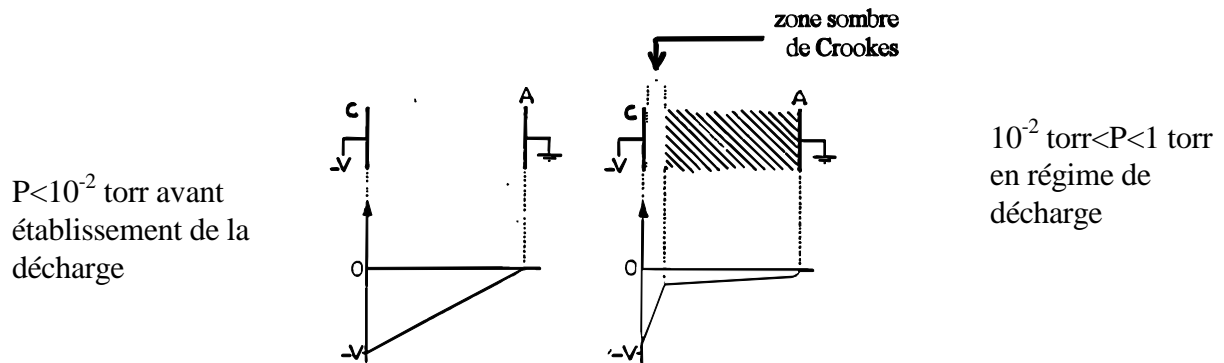
La cathode qui supporte le substrat est reliée au générateur HF (13,56 Mhz) par l'intermédiaire d'un adaptateur d'impédance. Les parois de la chambre reliées à la masse jouent le rôle d'anode. Le système de pompage est relié à la chambre par une vanne papillon de régulation de la pression.



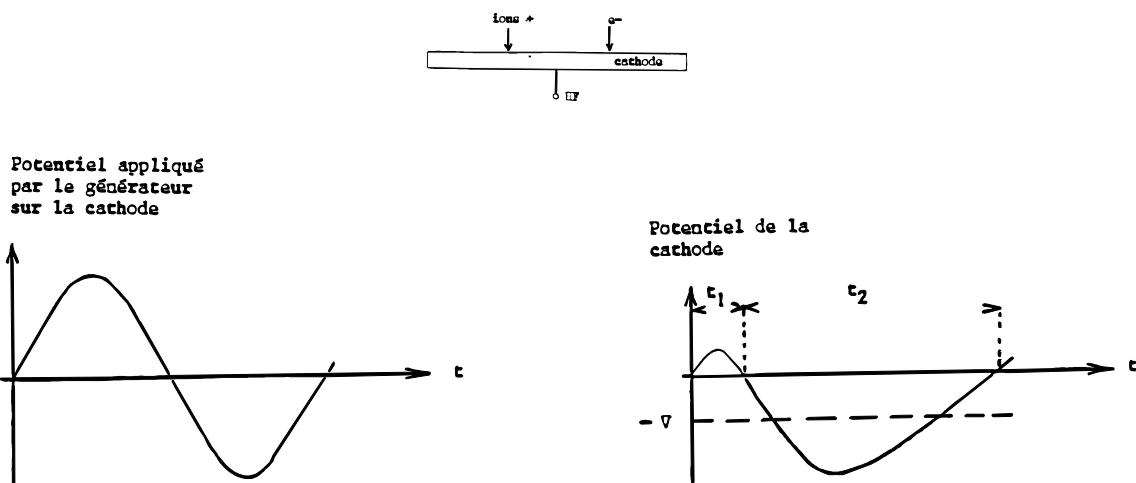
Les molécules du gaz introduit dans l'enceinte sont ionisées par collision avec les quelques électrons primaires contenus dans le gaz ou issus des parois.

Ces électrons, agités par le champ HF, se multiplient lors des collisions ionisantes et assurent le maintien de la décharge lumineuse.

On distingue, entre les deux électrodes, la zone lumineuse qui touche l'anode reliée à la masse, et une zone sombre appelée "zone de Crookes" ou bien "gaine de plasma" dont s'entoure la cathode. Cette gaine sombre constitue pratiquement la zone d'influence de la cathode vis à vis du plasma.



La zone lumineuse correspond au plasma, gaz ionisé globalement neutre ou quasi-neutre. Dans la gaine se trouvent alternativement des ions ou des électrons selon le signe de l'alternance de la tension haute fréquence. Lors de l'alternance positive de la tension HF, les électrons sont attirés par la cathode. Pendant l'alternance négative, ce sont les ions positifs qui sont attirés et qui neutralisent les électrons. Les ions ayant une vitesse de diffusion dans le plasma inférieure à celle des électrons, il y a plus d'électrons qui atteignent la cathode, et il en résulte l'apparition d'une polarisation négative sur cette électrode.



Le système évolue rapidement vers une polarisation d'équilibre (-V) telle que le flux d'électrons pendant t_1 soit neutralisé par le flux d'ions positifs pendant t_2 . C'est dans l'espace sombre de Crookes que s'effectue la chute de tension et l'accélération des espèces chargées. Il n'y a pas d'ionisation dans cette zone.

Les ions et les électrons qui bombardent la cible viennent de l'interface entre l'espace sombre de Crookes et le plasma. L'épaisseur de cette zone sombre évolue comme la polarisation continue négative. Elle dépend de la nature du gaz employé. Elle augmente lorsque la tension haute fréquence croît ou bien lorsque la pression dans l'enceinte diminue et inversement.

Les gaz les plus fréquemment utilisés sont donnés ci-après :

Matériau à graver	Gaz utilisés dans le plasma
Si, Si poly	CF ₄ (+O ₂), SF ₆ (+O ₂), CCl ₄ ...
SiO ₂ , Si ₃ N ₄	CF ₄ (+H ₂), C ₂ F ₆ , CHF ₃ , ...
Aluminium	CCl ₄ (+Cl ₂)
Résine	O ₂

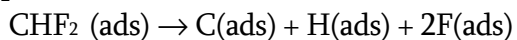
Mécanisme de gravure de SiO₂ avec CHF₃ :

1 - Dissociation: CHF₃ → CHF₂ + F

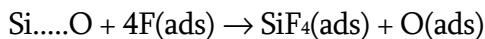
2 - Action mécanique des ions CHF₂⁺ : rupture des liaisons Si-O → Si.....O

3 - Action chimique:

- adsorption dissociative de CHF₂



- formation du produit volatil



La formation du produit volatil n'est possible que si la liaison Si-O a été rompue par l'action mécanique des ions. Il n'y a donc pas de gravure purement chimique, la gravure est fortement anisotrope puisque dépendant de l'action mécanique des ions.

Sélectivité de la gravure

En général, la gravure chimique par voie humide est parfaitement sélective (il suffit de choisir correctement le mélange d'attaque chimique). On définit un coefficient de sélectivité S qui est égal au rapport de la vitesse de gravure de la couche à enlever sur la vitesse de gravure de la couche de protection (qui est souvent la résine). Ce taux de sélectivité est pratiquement infini pour la gravure chimique humide mais il baisse largement dans le cas de la gravure sèche par RIE. En effet, les gaz réactifs ayant aussi une action mécanique sur la couche de protection, cette dernière est aussi gravée. Il faut donc régler le processus de gravure sèche (choix des gaz, pression, puissance du plasma...) pour avoir un taux de sélectivité supérieur à 1 (c'est-à-dire que la couche à enlever se grave plus vite que la couche de protection). Bien évidemment, l'épaisseur de la couche de protection étant limitée, l'épaisseur maximale de la couche à graver ne sera pas illimitée!

MISE EN OEUVRE DE LA GRAVURE HUMIDE DE L'ALUMINIUM

- mettre en marche le bain thermostaté à 40-45 °C à l'avance (attention au régulateur)
- verser 300 cc de la solution d'attaque (H_3PO_4) dans le bécher prévu à cet effet.
- placer le bécher dans le bain thermostaté et attendre que la température du bécher soit stabilisée (15 min)
- positionner les plaquettes à graver sur le panier quartz et plonger le tout dans le bain en agitant doucement le panier (rotation et translation verticale, petits motifs) pendant environ ** min. Observer la fin de la gravure par la disparition des parties alu non isolées et l'arrêt du dégagement gazeux.
- rincer (bac grand débit, jusqu'à $> 18 M\Omega$).
- séchage à la centrifugeuse.
- vérifier la gravure au microscope. Le cas échéant replonger les plaquettes dans la solution (1 min).
- récupérer la solution d'attaque
- élimination de la résine restante (gravure sèche sous O_2 , ou gravure humide avec le "remove")

Gravure sèche de la résine sous plasma de O_2

- mise en route de l'installation (marche, inter), mise en route des pompes (POMP), 1 min
- ventiler (VENT) suffisamment et ouvrir l'enceinte
- mise en place des plaquettes et refermer
- mise en route du pompage (POMPAGE) et attendre que le vide se stabilise à $\cong 0.020$
- lancer le processus (PROCESS). Le chauffage (lampe) se met en route et lorsqu'il atteint 200°C le plasma est créé. Arrêter le processus au bout de 2 min (temporisateur) avec (PROCESS).
- couper le pompage (POMPAGE) et ventiler (VENT) suffisamment
- ressortir les plaquettes, refermer la porte et remettre en pompage (POMPAGE)

MISE EN OEUVRE DE LA GRAVURE SECHE (élimination du SiO_2 face arrière pour un bon contact électrique sur le Si)

- **Gravure sèche en mode RIE:** plasma de CHF_3 (20cc/mn) + O_2 (1ccmn), 45 mT, 80 W
 - mise en route du programme de gestion (electronics), essai à vide (prog. Si thermique) (execute), mise en route du pompage (vacuum), arrêt du programme (abort), puis ouverture de la cloche à vide (vacuum), mise en place des plaquettes
 - fermeture de la cloche (vacuum) et lancement du programme de gravure (execute)

- observation du plasma et de la gaine sombre, observation de l'évolution de la gravure (teinte mate du bord vers l'intérieur de la plaquette), vitesse de gravure 600 Å/mn avec une seule plaquette dans le bâti.
- arrêt de la gravure, fin du programme puis ouverture de la cloche (air), enlever les plaquettes et refermer la cloche par mise sous vide (vacuum).

TRAVAIL A EFFECTUER POUR VII

Graver l'aluminium sur les plaquettes. Mesurer la hauteur de marche sur l'aluminium.

PRESENTATION DU CIME

Le CIME (Centre Interuniversitaire de Micro-Electronique) est l'un des trois pôles les plus importants en France dans la formation de spécialistes en microélectronique. Membre du Comité National de Formation en Microélectronique (CNFM), il fait partie d'un vaste réseau regroupant 12 centres de formation en microélectronique répartis à travers la France. Le CIME dispose de moyens expérimentaux lourds pour la conception, la fabrication, la caractérisation et le test des circuits intégrés et microsystèmes sur silicium. Le CIME assure la formation pratique de spécialistes en microélectronique (ingénieurs, techniciens). Il est centre de ressources pour la recherche et collabore avec le secteur industriel, notamment dans le cadre de la formation continue.

Le CIME a emménagé sur le site MINATEC en 2006.

LES MOYENS DU CIME EN TECHNOLOGIE ET CARACTERISATION

Une salle blanche de 400 m² (de classe 1000 avec postes de classe 100) permet la réalisation complète de circuits intégrés et microsystèmes.

EQUIPEMENTS DE HAUTE TECHNOLOGIE

- Equipements de salle blanche
 - 2 salles de chimie de 2 postes chacune.
 - Traitements thermiques : 2 batteries de fours, 1 bâti de recuit rapide.
 - Photolithographie : 3 machines simple-face, contact ; 1 machine double-face contact ou proximité.
 - Gravure ionique réactive : 2 bâti de gravure 1 DRIE.
 - Dépôt de couches minces : divers bâti dédiés aux dépôts de nitrure, silicium polycristallin, silice ou aluminium.
 - Implantation ionique : 1 implanteur moyen courant (bore, phosphore, arsenic)
 - Scellement de substrats : 1 équipement de scellement par thermo-compression.
 - Caractérisation et mesures électriques : 4 microscopes optiques, 1 microscope électronique à balayage, 1 caméra infrarouge, 1 ellipsomètre, 1 profilomètre, 2 mesures de "résistance carré", 1 compteur de particules.
- Equipements hors salle blanche
 - Caractérisation : 3 bancs de test sous pointes pour la caractérisation de capacités, 4 bancs de test sous pointes pour la caractérisation des transistors.
 - Montage : découpe des plaques, montage des puces en boîtiers, microsoudure des connexions.
 - Circuits hybrides couches épaisses : dépôt des couches par sérigraphie, séchage et cuisson, ajustage des résistances, report des puces et soudure des connexions, mesures

Equipements spécifiques pour les plates-formes dédiées :

- Plate-forme Biotechnologies : 1 robot de dépôt, 1 caméra, 1 paillasse de chimie.
- Plate-forme Nanomonde : 2 AFM (Atomic Force Microscope), 1 STM (Scanning Tunneling Microscope). 1 profilomètre optique à haute résolution.

LES MOYENS DU CIME EN CONCEPTION ET TEST

- Conception
 - Matériel informatique de type industriel connecté à INTERNET
 - 2 serveurs et une cinquantaine de stations de travail UNIX
 - Nombreux périphériques, dont un traceur pour l'impression de layout de circuits
 - Un système de sauvegarde à base de cartouches de haute densité
 - Une dizaine de logiciels industriels de conception de circuits intégrés, comprenant synthèse et simulation VHDL, saisie de schémas, simulation électrique et logique, dessin de masques, vérification de règles de dessin et de règles électriques (Cadence, Synopsys, Mentor Graphics)
 - Des Design Kits de principaux fondeurs (ST, AMS)
 - Des logiciels pour la conception de microsystemes (Ansys, Memscap)
 - Des logiciels intégrés pour la conception des circuits programmables (Altera, Xilinx)
- Test et Prototypage
 - 1 salle de TP de prototypage avec 12 PC
 - 1 salle de test : tests paramétriques et fonctionnels, sous pointes et en boîtiers
 - 1 atelier de microélectronique : appareillages de mesures, microscopes, plate-forme de prototypage

Standard ISO 14644-1 [modifier]

particules /m³

Classe	0,1 µm	0,2 µm	0,3 µm	0,5 µm	1 µm	5 µm
ISO 1	10	2				
ISO 2	100	24	10	4		
ISO 3	1 000	237	102	35	8	
ISO 4	10 000	2 370	1 020	352	83	
ISO 5	100 000	23 700	10 200	3 520	832	29
ISO 6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
ISO 7				352 000	83 200	2 930
ISO 8				3 520 000	832 000	29 300
ISO 9				35 200 000	8 320 000	293 000

La propreté particulaire doit être désignée par un numéro de classification N . La concentration maximale admissible C pour chaque particule de taille D prise en compte, est donnée par l'équation:

$$C = 10^N * \left(\frac{10^{-7}}{D} \right)^{2,08}$$

C est la concentration maximale admissible (en particules/m³ d'air)

N est le numéro de classification ISO

D est la taille considérée en micromètres

Ce qu'il faut retenir :

Classe ISO 3 = Classe 1 selon FS 209

Classe ISO 4 = Classe 10 selon FS 209

Classe ISO 5 = Classe 100 selon FS 209

Classe ISO 6 = Classe 1000 selon FS 209

Classe ISO 7 = Classe 10000 selon FS 209

Classe ISO 8 = Classe 100000 selon FS 209

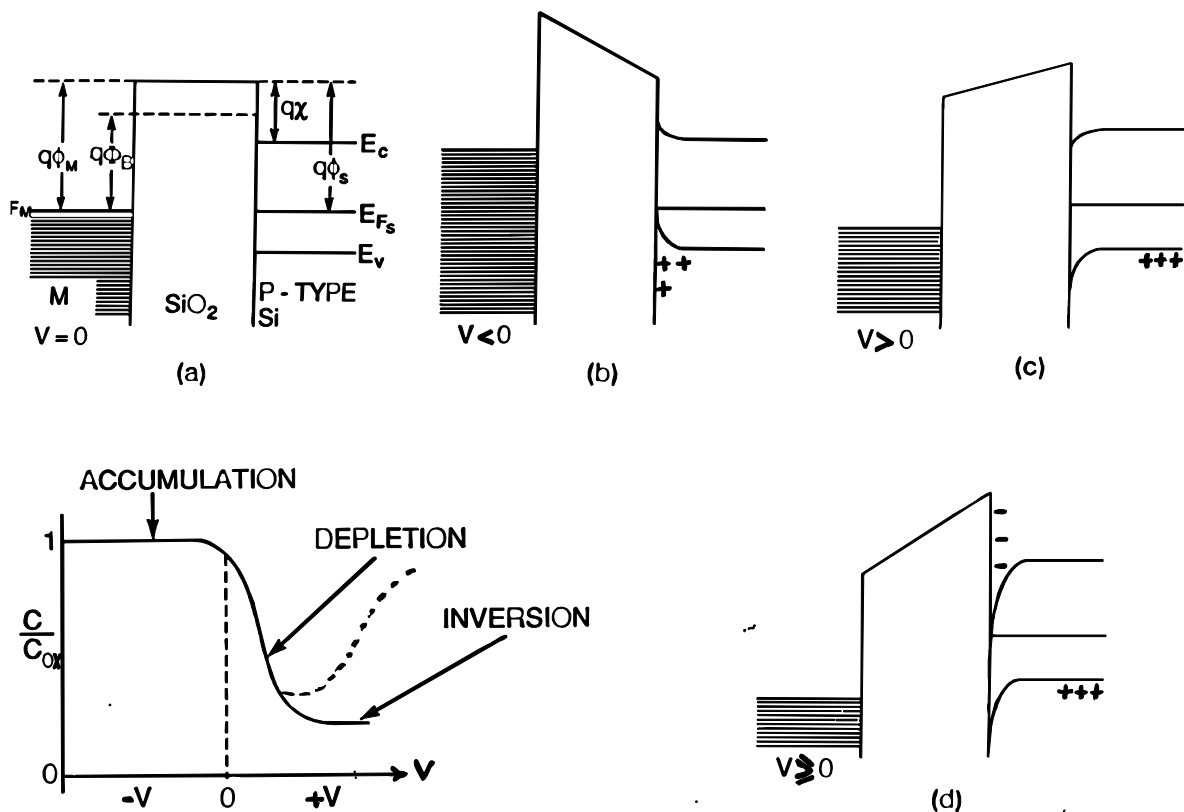
Cette norme européenne annule et remplace la norme NFX 44-101

Classe 100 : pas + de 100 particules ayant un diamètre > à 0.5µm dans un volume de 1 pied³
 1 pied = 0.3m
 1 pied³ = 0.027 m³
 soit pas plus de 100 particules de diamètre > à 0.5µm dans 0.027 m³
 soit 3700 particules -> 1m³
 soit pas plus de 3700 particules de diamètre > à 0.5µm dans 1 m³

VIII - ETUDE DE LA CARACTERISTIQUE C(V)

LES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES D'UNE CAPACITE MOS

Les figures ci-dessous reproduisent les diagrammes de bandes d'énergie d'une capacité MOS "idéale" en fonction de la polarisation dans le cas d'un semi-conducteur de type P: le travail de sortie Φ du métal et celui du semi-conducteur sont identiques, et aucune charge localisée n'est présente dans l'oxyde et aux interfaces. En l'absence de polarisation les niveaux de Fermi s'égalisent et aucune courbure de bande n'apparaît à l'interface SiO₂/Si.



• Pour une polarisation $V < 0$ sur le métal: régime d'accumulation

Les électrons du métal bénéficient d'un décalage positif d'énergie égal à qV par rapport au Si. Les charges + (trous) du semi-conducteur s'accumulent à l'interface SiO₂/Si. Le caractère P du Si est accentué et une courbure des bandes vers le haut se produit.

Cette accumulation à l'interface est équivalente à une capacité C_d très importante devant celle de l'oxyde C_{ox} . Ces deux capacités sont en série et la capacité résultante C est donnée par:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_d} \quad C_d \text{ étant très grand devant } C_{ox}: C_{ox} \cong C = (\epsilon_0 \epsilon_{ox} S)/e$$

Connaissant l'épaisseur e de l'oxyde, on peut déterminer la constante diélectrique ϵ_{ox} de celui-ci: $C_{ox} = (\epsilon_0 \epsilon_{ox} S)/e$

• **Pour une polarisation $V > 0$ sur le métal: régime de déplétion et d'inversion**

Les charges + (trous) désertent l'interface SiO_2/Si . Le semi-conducteur se comporte comme un diélectrique dont la capacité C_d dépend de l'étendue de cette zone de désertion. Les deux capacités C_{ox} et C_d sont comparables et la capacité résultante C diminue. Les bandes se courbent vers le bas à l'interface SiO_2/Si où le semi-conducteur prend un caractère N. Lorsque la polarisation $V > 0$ devient importante, des électrons sont attirés à l'interface et la courbure de bande devient importante (régime d'inversion). La capacité C tend vers un minimum correspondant à une extension maximum de la zone désertée par les charges + (trous).

La mesure de $C(V)$ se fait en utilisant une tension alternative de faible amplitude superposée à une tension continue variable. Dans ces conditions les porteurs minoritaires (électrons) n'interviennent pas. Par contre si une tension à très basse fréquence est utilisée, ils échangent alors avec la couche d'inversion et on constate une remontée de la capacité C pour des polarisations très positives (partie pointillée de la courbe).

Lorsque le métal et le semi-conducteur ne possèdent pas le même travail de sortie et lorsqu'il existe des charges mobiles dans l'oxyde et fixes à l'interface SiO_2/Si , une courbure de bande apparaît même en l'absence de polarisation (cas non idéal). La caractéristique $C(V)$ se décale alors le long de l'axe des tensions V d'une quantité V_{FB} qu'on appelle potentiel de bande plate. Cette quantité dépend:

- de la différence $\Phi_M - \Phi_S$ des travaux de sortie
- de la densité de charges fixes Q_{SS} à l'interface SiO_2/Si
- de la densité de charges $\rho(x)$ à l'intérieur de l'oxyde

TRAVAIL A EFFECTUER SUR VIII

- Tracer les caractéristiques $C(V)$ sur deux géométries différentes et des dopages différents.
- A partir de l'allure de la courbe confirmer la nature du semi-conducteur.
- Déterminer la constante diélectrique de l'oxyde à partir de la connaissance de son épaisseur.