
**TRAVAIL PRATIQUE DE
TECHNOLOGIE MICROELECTRONIQUE**

**REALISATION DE CIRCUITS
INTEGRES MOSTEC**

**Métal-Oxyde-Silicium
TEChnologie
TRANSISTORS MOS A GRILLE EN
POLYSILICIUM SUBMICRONIQUES**

<u>INTRODUCTION.....</u>	<u>3</u>
<u>REALISATION DU TRANSISTOR MOS, VUE D'ENSEMBLE DE LA FILERE.....</u>	<u>5</u>
<u>OXYDE DE GRILLE ET DEPOT CVD DE SI POLYCRISTALLIN</u>	<u>6</u>
NETTOYAGE AVANT OYDATION SECHE	7
L'OBTENTION D'OXYDE DE SILICIUM.....	8
DEPOT CVD.....	15
<u>LITHOGRAPHIE ET GRAVURE DU SILICIUM POLYCRISTALLIN.....</u>	<u>17</u>
LA PHOTOLITHOGRAPHIE	20
LA GRAVURE	23
<u>DOPAGE DES SOURCES, DRAINS ET GRILLES</u>	<u>29</u>
LE DOPAGE DU SILICIUM.....	31
DIFFUSION THERMIQUE	31
L'IMPLANTATION IONIQUE	35
LA METHODE DES 4 POINTES.....	39
L'ELLIPSOMETRIE.....	43
LE MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE	46
<u>REALISATION DE L'OXYDE DE PROTECTION.....</u>	<u>51</u>
<u>REALISATION DES CONTACTS</u>	<u>53</u>
LA METALLISATION	55
EVAPORATION SOUS VIDE.....	56
PULVERISATION CATHODIQUE.....	58
<u>ANNEXES</u>	<u>59</u>
DESCRIPTIF DU CIRCUIT MOSTEC	60
SURPERPOSITION DES NIVEAUX.....	61
MASQUE OUVERTURE ZONES ACTIVES ET MASQUE SI POLY	62
MASQUE OUVERTURE CONTACTS ET MASQUE METALLISATION	63
DETAILS DES DIFFERENTS DISPOSITIFS	64

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Le but de ce cycle de travaux pratiques est de permettre une prise de contact concrète avec les méthodes de fabrication des circuits intégrés. A cette fin, **plusieurs séances en salle** permettent de passer en revue les principales étapes de fabrication pour la filière NMOS à grille en silicium polycristallin, à savoir :

- oxydation,
- dépôt de couches par *CVD* (Chemical Vapour Deposition),
- photolithographie,
- gravure,
- implantation,
- métallisation,

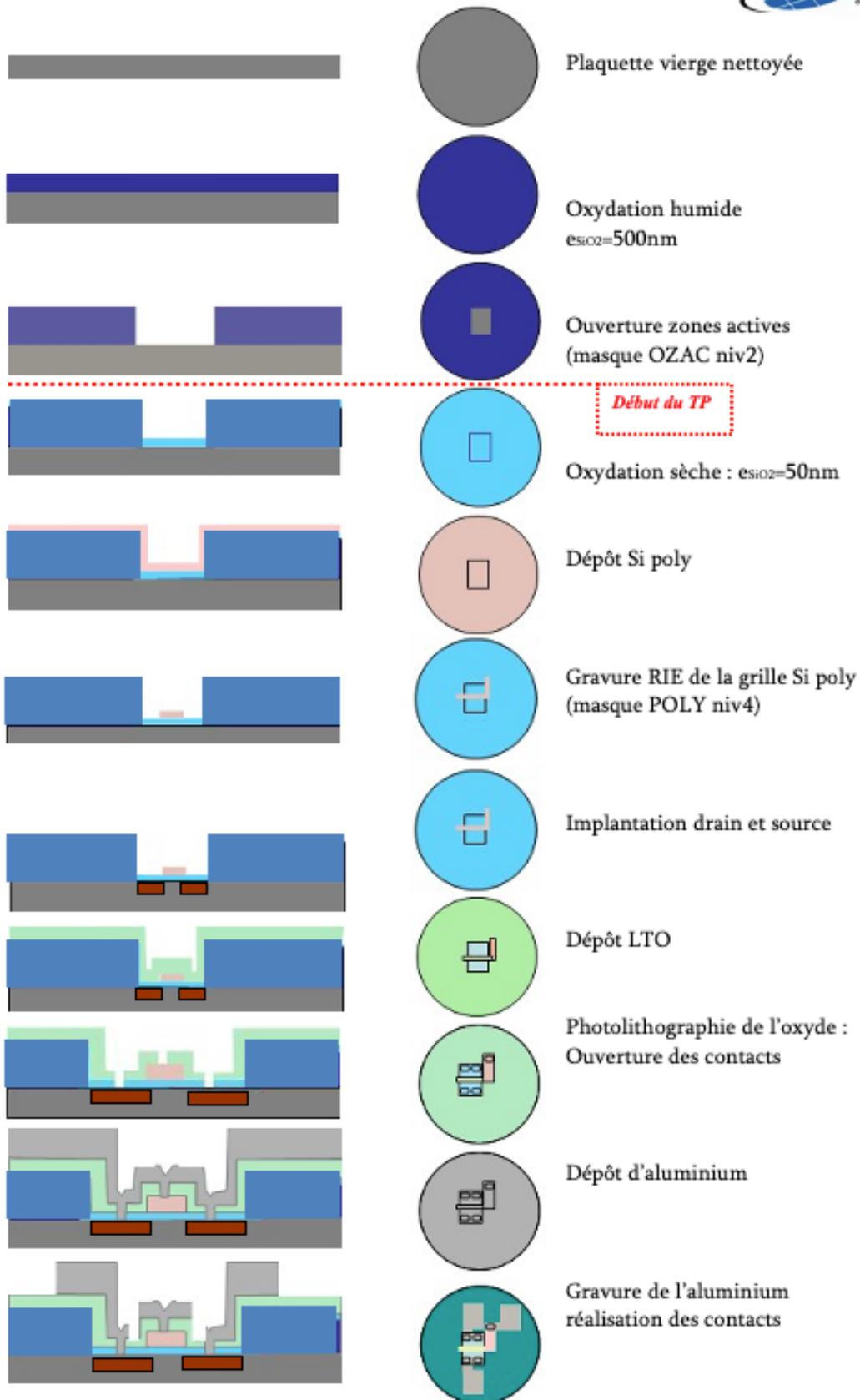
et des moyens de caractérisation :

- méthode des quatre pointes,
- ellipsométrie, profilomètre,
- *MEB* (microscope électronique à balayage)

Le circuit intégré MOSTEC est un circuit de test technologique qui comporte tous les motifs utiles pour déterminer la cause d'un éventuel défaut au cours de la fabrication. Sa description détaillée est fournie en fin du fascicule.

Le TP débute avec des plaques en silicium oxydées ($0.5\mu\text{m}$ d'oxyde thermique humide). Cette couche d'oxyde de champ a été photolithographiée puis gravée afin d'ouvrir les zones utiles aux dispositifs qui vont être réalisés par la suite.

MOSTEC PROCESS FLOW



Oxyde de grille et Dépôt CVD de Silicium Polycristallin

NETTOYAGE AVANT OXYDATION ET OXYDE DE GRILLE

- **Nettoyage du silicium et décapage de l'oxyde natif.** Ce nettoyage est garant de la qualité de la future interface Si-SiO₂.
 - préparation des bains de HF dilué (5%) et mélange H₂O₂ :H₂SO₄ en proportion 1/1
 - attaque HF dilué (5 s) et rinçage
 - attaque mélange H₂O₂ :H₂SO₄ (15 min) et rinçage
 - attaque HF dilué (5 s) et rinçage
 - séchage des plaquettes à la centrifugeuse
 - nettoyage des béchers et de la pailleuse

- **Calcul théorique**
 - à l'aide du modèle de Deal et Grove et des abaques joints, on peut déterminer le temps nécessaire à la formation d'une couche de 50 nm d'oxyde à la température de 1050°C. (Application : calcul de l'épaisseur de Si consommé pour former les 50 nm de SiO₂).

- **Oxydation mince du Si** : elle s'effectue dans un four à parois de quartz.
 - disposer les plaquettes et une plaquette témoin dans la nacelle 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

- **Dépôt du Silicium polycristallin par LPCVD** (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) à partir du silane SiH₄ pyrolysé dans un four à 625°C à une pression totale de 0,5 torr.
 - les plaquettes seront placées dans une nacelle, méplat vers le bas, face polie vers le flux de gaz (l'injection de silane se fait par l'avant du four)
 - contrôle des différentes séquences (purge, pompage, test de fuite...) effectué par un automate programmable
 - durée du dépôt 40 minutes, épaisseur de silicium déposé 250nm

L'OBTENTION D'OXYDE DE SILICIUM

INTRODUCTION:

L'objectif est de créer à la surface du silicium un oxyde (SiO_2) qui sera utilisé, soit comme isolant diélectrique (grille de transistor MOS, isolation entre interconnexions), soit comme couche de protection.

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

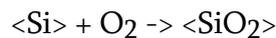
- à haute température (700 à 1250°C) en présence d'un courant gazeux oxydant (oxyde thermique),
- à basse température par dépôt chimique en phase vapeur *CVD* (oxyde déposé).

L'OXYDATION THERMIQUE :

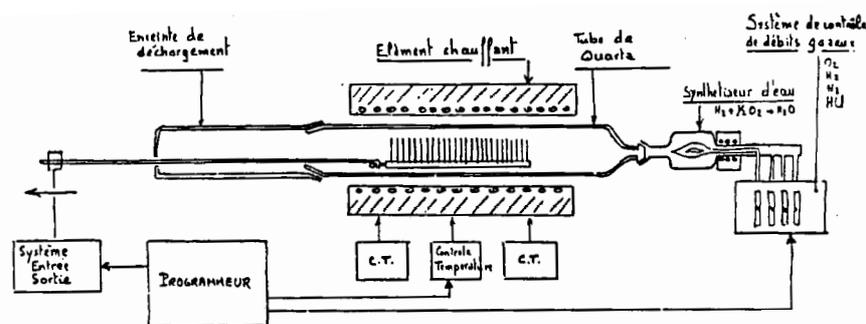
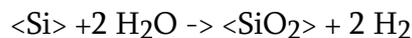
• Principe :

On forme une couche de silice SiO_2 à la surface de la plaquette de silicium par oxydation dans un four à haute température (voir figure) 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 :



- l'oxydation humide, beaucoup plus rapide, se caractérise par un courant d'oxygène chargé en vapeur d'eau, soit :



Système d'oxydation thermique.

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/SiO_2 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 la surface Si/SiO_2 $\langle \text{Si} \rangle + \text{O}_2 \rightarrow \langle \text{SiO}_2 \rangle$
- 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 linéaire :

$$e^2 + A.e = B.t \text{ (modèle de Deal et Grove)}$$

où e est l'épaisseur d'oxyde formé

t le temps d'oxydation

B une constante qui caractérise la diffusion de O_2 dans SiO_2

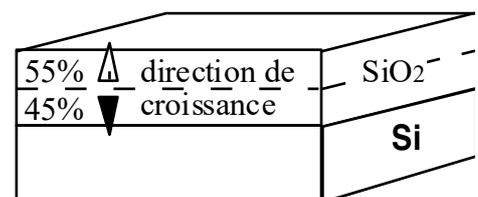
B/A une constante qui caractérise la réaction à l'interface.

Les paramètres B et B/A 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 2000\AA en oxygène sec, alors qu'une même épaisseur est obtenue en moins d'une heure en oxydation humide. Les figures de la page suivante permettent de déterminer la constante B et le rapport B/A en fonction de la température et des conditions d'oxydation.

Durant l'oxydation, il y a consommation de Si, et par conséquent, l'interface Si/SiO_2 se déplace vers l'intérieur de la plaquette. On admet en première approximation que :

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

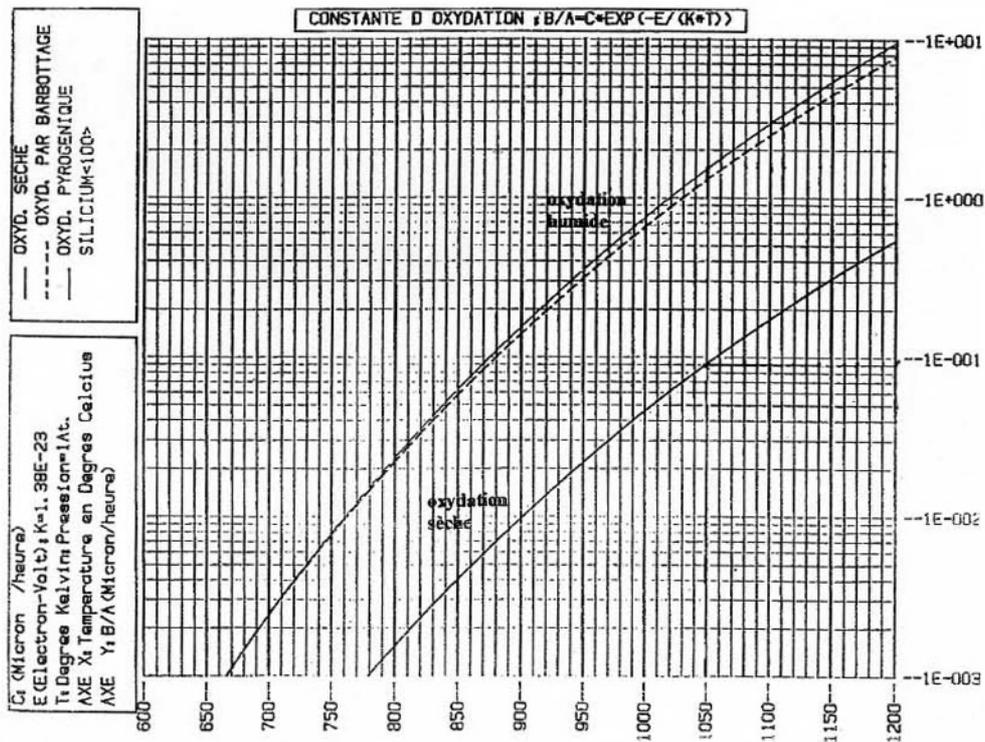
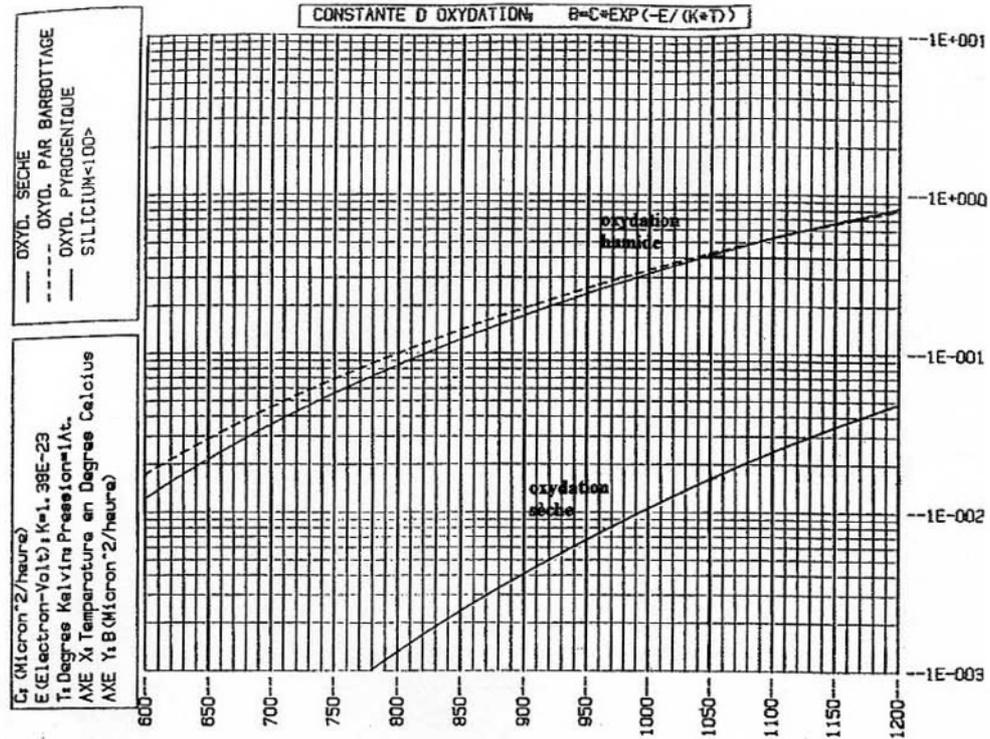
où e_{Si} est l'épaisseur de Si consommée et e_{Ox} l'épaisseur d'oxyde formé. Donc pour avoir $1\ \mu\text{m}$ de SiO_2 thermique, on consomme environ $0,5\ \mu\text{m}$ de Si.



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.

• **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 500Å, une tension de 60V théorique). Toutefois, cette valeur n'est atteinte que si l'interface Si/SiO₂ est parfaite, 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).



Evolution de B et B/A en fonction de la température pour différents types d'oxydation (Si, orientation <100>).

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

• **Contrôle de l'épaisseur :**

Le contrôle de l'épaisseur d'oxyde peut être réalisé par différentes méthodes, telle que la profilométrie mécanique (alphastep) ou l'ellipsométrie. Une première indication de l'épaisseur est donnée par la couleur réfléchiée par la plaquette de silicium recouverte de silice, éclairée 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

L'OXYDE DEPOSE

Les oxydes d'isolement entre couches conductrices ou de protection ne peuvent être obtenus que par dépôt. Le principe général est de provoquer une réaction chimique au niveau d'un mélange gazeux conduisant à la formation de SiO₂ et de composés volatils, par exemple : $\text{SiH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$. On utilise fréquemment le silane SiH₄ ou le SiCl₄ pour l'apport de silicium, la réaction chimique étant une combustion (par O₂) ou une pyrolyse (par CO₂, H₂). Les températures de réaction se situent entre 300 et 1000°C ce qui permet de ne pas modifier profondément les caractéristiques des structures préexistantes.

La désignation générale du procédé est dépôt chimique en phase vapeur, plus connu sous l'appellation anglo-saxonne *CVD* (chemical vapor deposition) avec les variantes LPCVD (low pressure *CVD*) qui conduit à un oxyde de bonne qualité et *LTO* (low temperature oxydation) où l'énergie d'activation est obtenue par haute fréquence (plasma) ce qui permet de travailler à des températures inférieures à 400°C.

MISE EN ŒUVRE DE L'OXYDATION SECHE

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

L'oxydation est réalisée à l'aide d'une installation qui permet de soumettre les plaquettes à un cycle de température sous atmosphère contrôlée. Ce cycle est détaillé dans le tableau ci-dessous.

PAS	NOM DU PAS	DUREE DU PAS	NATURE 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	

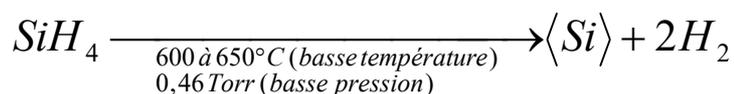
LE DEPOT CHIMIQUE EN PHASE VAPEUR DU SILICIUM POLYCRISTALLIN

Le silicium polycristallin est utilisé dans la fabrication des circuits intégrés comme grille de transistors MOS, résistance ou conducteur. Les avantages du silicium polycristallin par rapport à l'aluminium sont de deux ordres :

- la tension de seuil des transistors MOS dont la grille est en silicium polycristallin est diminuée par rapport à une grille en aluminium,
- le silicium polycristallin accepte des températures assez élevées, environ 900°C contre 450°C pour l'aluminium.

Le dépôt chimique en phase vapeur à basse pression (*LPCVD* Low Pressure Chemical Vapor Deposition) est une méthode de dépôt de couches diélectriques ou semi-conductrices par passage de gaz réactifs sur un substrat chauffé induisant une réaction thermique stimulée à la surface de ce substrat. Ce procédé utilise une chambre de réaction, généralement constituée d'un tube de quartz. Un bloc support chauffant reçoit le substrat; l'ensemble est complété par un système de tubes, vannes et débitmètres qui permettent d'amener les gaz dosés dans la chambre.

Le dépôt de silicium polycristallin est réalisé à partir du tétra hydrure de silicium SiH_4 , appelé aussi silane (gaz dangereux et explosif en présence d'oxygène) qui est pyrolysé à des températures comprises entre 600 et 650°C. La réaction chimique mise en jeu est :



A ces températures (600°C), il faut noter que le coefficient de diffusion des dopants est tout à fait négligeable. Le dépôt se faisant à une pression de 0,46 torr, la géométrie du réacteur influe très peu sur la vitesse de dépôt du silicium polycristallin.

Cette couche de Silicium polycristallin, une fois photolithographiée et gravée, va constituer la grille des transistors.

Le Si poly n'étant pas bon conducteur, il va falloir le doper. Si l'on choisit de fabriquer, à partir de ce jeu de masque MOSTEC, les transistors à grille submicronique, le choix de l'élément dopant est capital : il faut choisir un donneur d'électron plus « gros » que le phosphore, habituellement utilisé, afin que la trajectoire des espèces implantées ne se termine pas sous la grille et ne déplete le futur canal. L'arsenic est un bon candidat pour cela, néanmoins il sera impossible de doper correctement la future grille en silicium polycristallin en même temps que le drain et la source seront réalisés.

En effet, pour activer électriquement les dopants après implantation et reconstruire la maille cristalline, un recuit doit être effectué ; dans notre cas, il doit être « rapide » pour ne pas faire diffuser jusque sous les grilles submicroniques les espèces implantées. Or, sans diffusion, la grille ne sera pas dopée correctement.

Une méthode peut alors être envisagée : implanter pleine plaque (avec du phosphore) la couche de Si Poly, recuire dans un four à diffusion, puis procéder à la photolithogravure de cette couche de silicium polycristallin.

Une fois les grilles créées, nous procéderons à une implantation d'arsenic et à un recuit d'activation rapide pour créer le drain et la source.

Lithographie et Gravure du Silicium Polycristallin

LITHOGRAPHIE ET GRAVURE DU SILICIUM POLYCRISTALLIN

3 étapes technologiques:

(i) la photolithographie du niveau poly ;

(ii) la gravure sèche (plasma en mode RIE) du silicium polycristallin ;

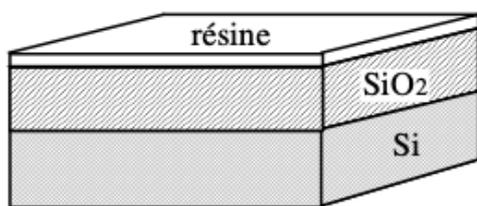
(iii) l'élimination par la gravure sèche de la résine

- **Photolithographie du niveau poly (pour réaliser les motifs sub-microniques)**
 - ➔ mise en place du masque
 - ➔ dépôt de résine photosensible : pour l'obtention des grilles submicroniques, utilisation de la résine S1805
 - mise en place de la plaquette sur la tournette, rotation à 4000t/min pendant 20 s et dépôt de quelques gouttes d'accroche (primer)
 - dépôt de la résine au centre de la plaquette puis étalement par rotation
 - séchage de la résine sur plaque chauffante 90°C, 2'30''
 - ➔ reproduction du masque sur la résine
 - mise en place de la plaquette sous le masque
 - alignement du masque avec les motifs présents sur la plaquette
 - contact mode vacuum et insolation 5 sec sur MA6
 - développement de la résine (à 1 min) de façon à éliminer les zones insolées
 - contrôle des motifs au microscope
 - durcissement de la résine sur plaque chauffante 90°C, 2'30''
- **Mesure à l'alphastep de l'épaisseur de résine**
- **Gravure sèche (plasma de SF₆ en mode RIE) du Si poly**
 - mise en route du programme de gestion, ouverture de la cloche à vide (air), mise en place des plaquettes, réglage du laser
 - fermeture de la cloche (vacuum) et lancement du programme de gravure (logiciel NAPS, execute, new, choix de la recette puis run et OK)
 - observation de l'évolution de la gravure (teinte mate du bord vers l'intérieur de la plaquette), environ 1 minute pour 2500Å de Si poly à graver avec une seule plaquette dans le bâti.
 - arrêt de la gravure en route (abort), fin du programme puis ouverture de la cloche (air), enlever les plaquettes et refermer la cloche sous vide (vacuum)
- **Mesure à l'alphastep de l'épaisseur de résine restante + l'épaisseur de Si poly gravée**
- **Elimination par gravure sèche (plasma O₂) de la résine**
 - **Mesure à l'alphastep de l'épaisseur de Si poly après gravure RIE**
 - ➔ En déduire l'épaisseur de résine gravée par RIE. Conclure sur la sélectivité de la gravure RIE avec SF₆ du SiPoly par rapport à la résine. Dans ces conditions et en supposant que la vitesse de gravure est constante, en déduire l'épaisseur maximale de SiPoly qui pourrait être gravée.

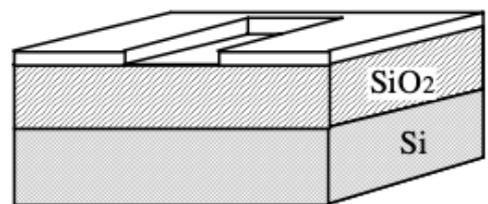
LA PHOTOLITHOGRAPHIE

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 du circuit MOSTEC nécessite au minimum 3 niveaux de masquage, permettant de définir successivement les zones utiles, les régions en silicium polycristallin et celles à doper, les prises de contact (facultatif) et enfin les interconnexions.

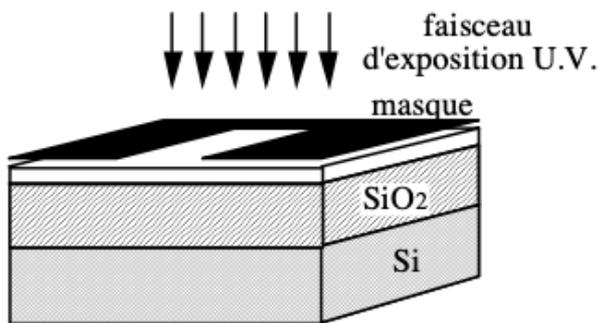
Le procédé de photolithographie se déroule selon les séquences suivantes :



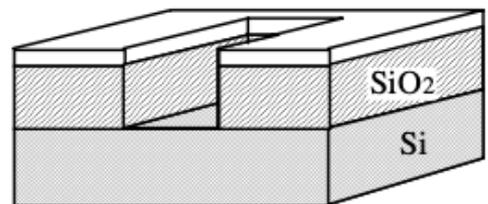
1. étalement d'une résine photosensible



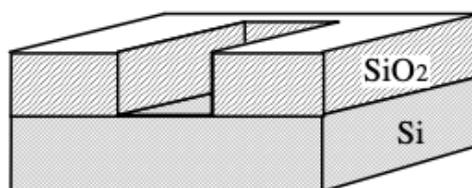
3. développement de la résine



2. exposition de la résine à travers le masque aligné



4. gravure de la couche



5. élimination des résidus de résine

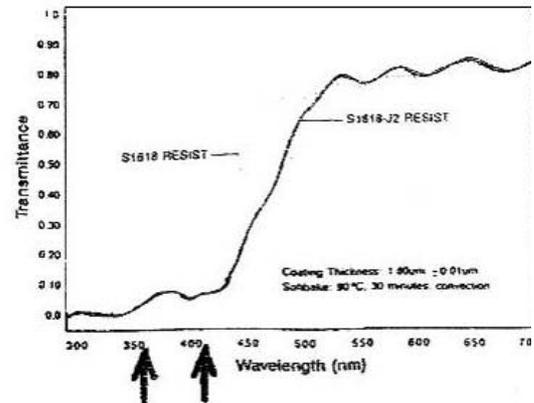
ÉTALEMENT D'UNE RESINE PHOTOSENSIBLE sur la couche à graver par centrifugation. La plaquette est plaquée par aspiration sous vide sur un support tournant; quelques gouttes de résine sont déposées au centre ; la force centrifuge étale la résine en un film ayant une épaisseur bien définie suivant la fluidité de la résine et la vitesse de rotation.

SECHAGE DE LA RESINE : 2'30'' sur une plaque chauffante à 120°C pour la résine S1813 (pour les photolithographies autre que le niveau poly)

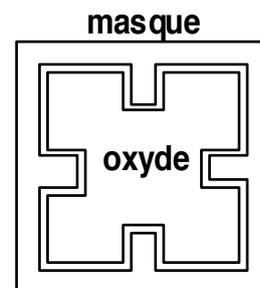
EXPOSITION DE LA RESINE A UN RAYONNEMENT U.V. (lampe à vapeur de mercure) à travers le masque à reproduire. La résine S1813 est exposée à l'ensemble du spectre d'émission du Hg mais elle est sensibilisée par deux longueurs d'onde du spectre du Hg, situées dans l'ultraviolet:

- 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 qui modifie la structure des molécules organiques et permet ainsi l'attaque chimique. Sur la figure ci-contre, on constate que la résine utilisée présente une transmittance quasi nulle (et donc une absorption maximum) aux longueurs d'onde des raies ultraviolettes de la lampe utilisées (flèches) pour la lithographie



- 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 (fig. ci-contre).



Croix d'alignement.
Positionnement du niveau 4
(motifs à reproduire sur le SiPo
par rapport au niveau 2 (oxyde

- 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 UV (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) : 2'30'' sur une plaque chauffante à 120°C pour la résine S1813

Il reste à procéder à l'**ATTAQUE DE LA COUCHE A GRAVER** dans les régions non protégées par la résine (cf. gravure).

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.

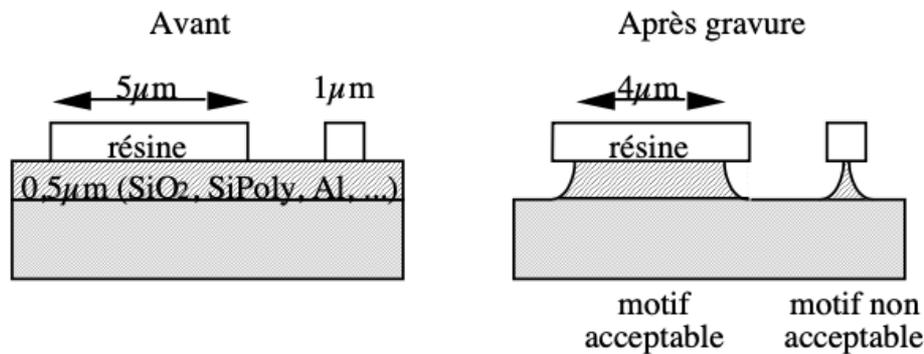
LA GRAVURE

INTRODUCTION

Succédant immédiatement à la lithographie, la gravure est parfois assimilée à cette opération sous le nom de lithogravure.

Initialement, la gravure s'est faite par voie d'attaque chimique en milieu humide. Les oxydes sont généralement gravés par des bases ou des acides (acide fluorhydrique HF pour la silice). Les propriétés principales de l'attaque chimique sont :

- la sélectivité très grande qui est liée au choix des agents chimiques permettant d'arrêter l'attaque à l'interface de deux couches différentes,
- l'isotropie qui conduit à une mauvaise définition du motif à graver, en particulier sur la gravure latérale. Par contre, le profil résultant est favorable pour la continuité du dépôt des couches supérieures.



Les procédés de gravure sèche ont été introduits plus récemment pour résoudre les problèmes d'isotropie et de contamination posés par la gravure humide. C'est le passage obligé pour accéder aux technologies de plus en plus denses avec une maîtrise accrue de la qualité. Il s'agit donc de choisir le type de gravure suivant les dimensions des motifs à reproduire. En effet, avec un système d'attaque chimique par voie humide qui est isotropique, le résultat de la gravure est inacceptable dès que les dimensions des motifs sont du même ordre de grandeur que l'épaisseur des couches attaquées.

GRAVURE CHIMIQUE PAR VOIE HUMIDE

Les problèmes rencontrés lors d'une attaque chimique par voie humide sont : (i) l'isotropie de l'attaque, (ii) l'utilisation d'agent d'attaque dangereux et (iii) le rinçage correct des échantillons. Le principale avantage est la grande sélectivité de toutes ces solutions ce qui permet de toujours avoir un substrat indemne après l'attaque.

Couche à graver	Solution d'attaque
SiO ₂	HF diluée
Si	HNO ₃ (oxydation) + HF (attaque SiO ₂) ou KOH
Al	H ₃ PO ₄ à 40°C

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), alors il y a réaction mécanique (usinage 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 Reactiv Ion Etching)**. De cette manière, on associe le mécanisme chimique (plasma) à l'origine de la sélectivité vis-à-vis de la couche à graver et le mécanisme physique (bombardement 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.

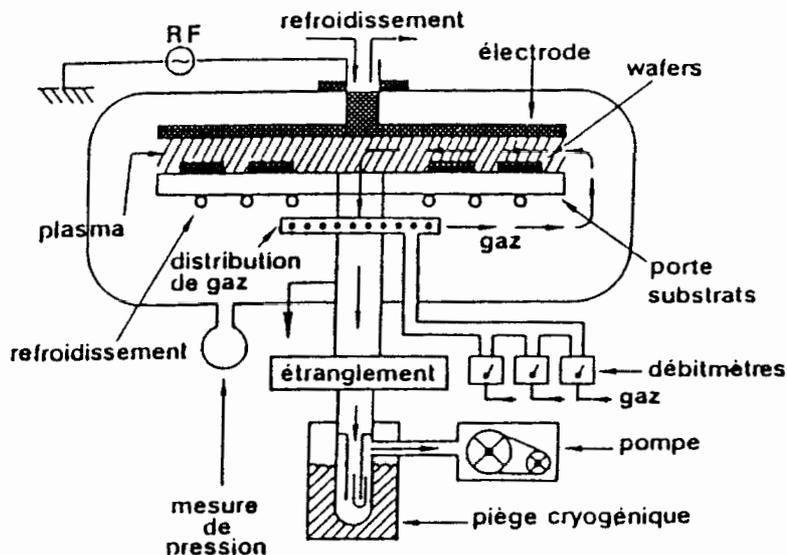


Schéma du réacteur à plasma planaire.

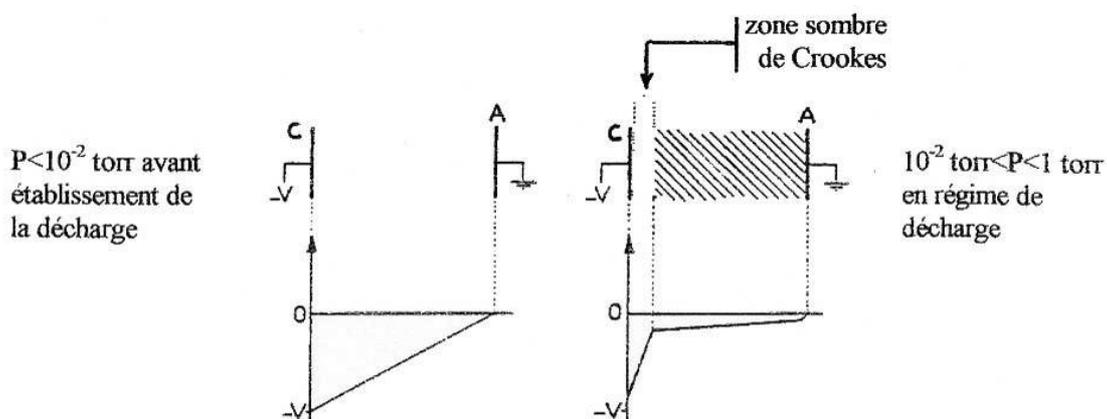
Il faut cependant noter que si le principal avantage de la gravure sèche est l'anisotropie de l'attaque tout en gardant une forte sélectivité par un choix judicieux du gaz de réaction, certains inconvénients nouveaux apparaissent : les énergies mises en jeu peuvent provoquer des défauts à la surfaces 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.

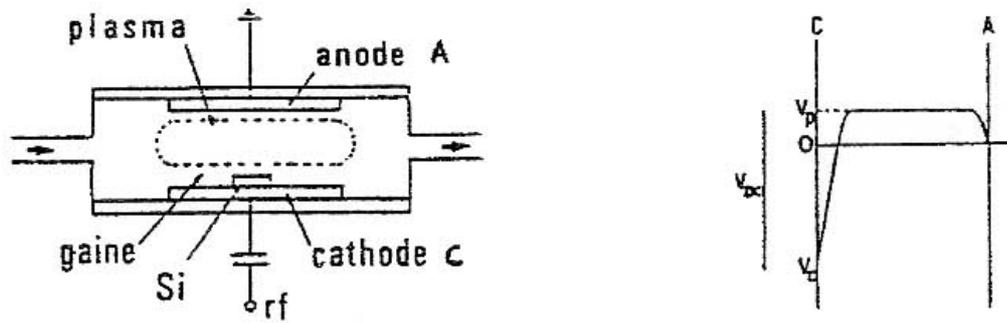
Principe de la gravure ionique réactive:

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.

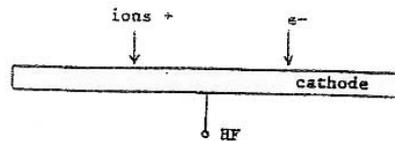
Les molécules du gaz introduit dans l'enceinte sont ionisées par collision avec les quelques électrons primaires contenus dans le gaz ou issus des parois. Ces électrons, agités par le champ HF, se multiplient lors des collisions ionisantes et assurent le maintien de la décharge luminescente.

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

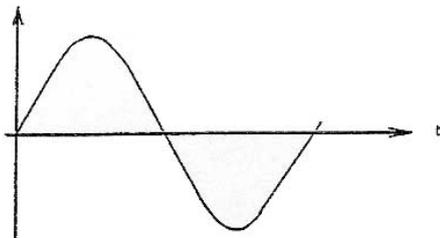




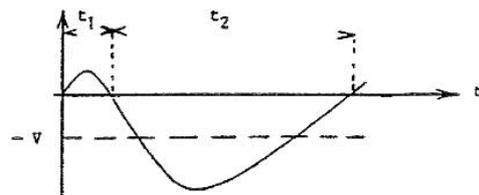
La zone lumineuse correspond au plasma, gaz ionisé globalement neutre ou quasi-neutre. Dans la gaine se trouvent alternativement des ions ou des électrons selon le signe de l'alternance de la tension haute fréquence. Lors de l'alternance positive de la tension HF, les électrons sont attirés par la cathode. 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.



Potentiel appliqué par le générateur sur la cathode



Potentiel de la cathode



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 ...
Aluminium	CCl ₄ (+Cl ₂)
Résine	O ₂

Mécanisme de gravure de Si avec SF₆

- mise en place du plasma en appliquant une décharge RF au gaz SF₆ présent dans la chambre de réaction à basse pression
- dissociation du SF₆ dans le plasma : $SF_6 \rightarrow SF_4^+ + 2 F^+$
- adsorption du fluor sur le silicium
- formation spontanée du produit volatil : $Si + 4 F (ads.) \rightarrow SiF_4 (gaz)$

Effet de chargement

La vitesse d'attaque du silicium dans un plasma de SF₆ dépend de la taille de la surface à graver. La vitesse de réaction ($Si + 4 F (ads.) \rightarrow SiF_4 (gaz)$) n'est limitée que par le taux de création d'espèces actives neutres F qui doivent être disponibles pour former SiF₄. Ce taux étant considéré comme constant pour un plasma donné, l'augmentation de surface de silicium à graver entraîne donc un appauvrissement en espèces actives F et une diminution de la vitesse de réaction, donc de la vitesse de gravure.

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!

Dopage des Sources et Drains

DOPAGE DES SOURCES, DRAINS
(ET GRILLES)

1 étape technologique : l'implantation ionique et 3 étapes de caractérisations

→ **Caractérisation physique**

- **Ellipsométrie** : mesure d'épaisseur d'oxyde (plaquette témoin).
- **Résistance carrée (méthode des quatre pointes)**.
- **Microscope électronique à balayage** : analyse des motifs.
Observer et commenter vos observations des croix d'alignement et des verniers, des barres de SiPoly, des grilles des transistors.

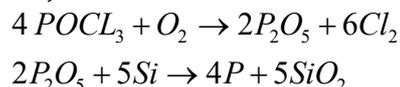
→ **Implantation ionique**

- **Implantation ionique** :
Description de l'implanteur.
Implantation des impuretés et recuit d'activation.
- **Calcul théorique** :
Supposant que l'implantation ionique de phosphore se fasse avec un courant de 200µA pendant 2 minutes sur une surface de 91cm², calculer la dose implantée. L'implantation se fait à une énergie de 25keV dans du silicium de type P dopé à environ 10¹⁶cm⁻³ ; quelle est la concentration maximale en phosphore et la profondeur de la jonction juste après l'implantation ? Un recuit thermique de 20 minutes à 1000°C est ensuite effectué ; quelle est la profondeur de la jonction finale ?

→ **Alternative à l'implantation ionique**

- **Diffusion thermique, principe**
Au lieu d'utiliser l'implantation ionique, il est possible d'avoir recours à la diffusion thermique, cette méthode est constituée de deux étapes :
 - le prédépôt d'impuretés en surface
 - la redistribution des impuretés par recuit à 1000°C

Le dopant choisi est le phosphore, il est introduit dans le four sous forme de POCl₃ gazeux. Les réactions chimiques mises en jeu sont les suivantes :



Une couche de silice va donc se former en même temps que le dopage, elle sera enlevée par la suite.

- **Calcul théorique** :
Sachant que l'on choisit un temps de prédépôt de 20 min à une température de 1000°C et un temps de redistribution de 20 min à 1000°C, en déduire la quantité d'impuretés

introduites dans le silicium au cours du prédépôt et la profondeur de la jonction obtenue après redistribution. Le substrat est de type p avec une résistivité entre 1 et 10 ohmcm.

LE DOPAGE DU SILICIUM

INTRODUCTION

Le dopage consiste à introduire des impuretés qui se substituent à des atomes de silicium dans le réseau cristallin de façon à le rendre de type p ou n . Deux méthodes sont utilisables pour réaliser ce dopage : la diffusion thermique ou l'implantation ionique.

DIFFUSION THERMIQUE

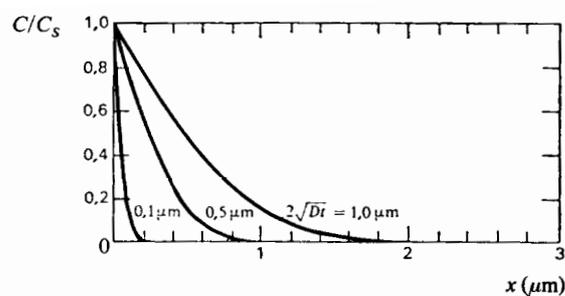
Le processus de diffusion thermique est la combinaison de deux étapes :

- la première est le **prédépôt** où le dopant est fourni sous forme gazeuse en quantité contrôlée et suffisante pour que la concentration en surface atteigne la solubilité limite du dopant dans le silicium (10^{20} à 10^{21} atomes/cm³). La répartition des impuretés au voisinage de la surface obéit alors à la loi de diffusion à concentration superficielle constante qui est définie par :

$$c(x, t) = c_s \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1}}\right)$$

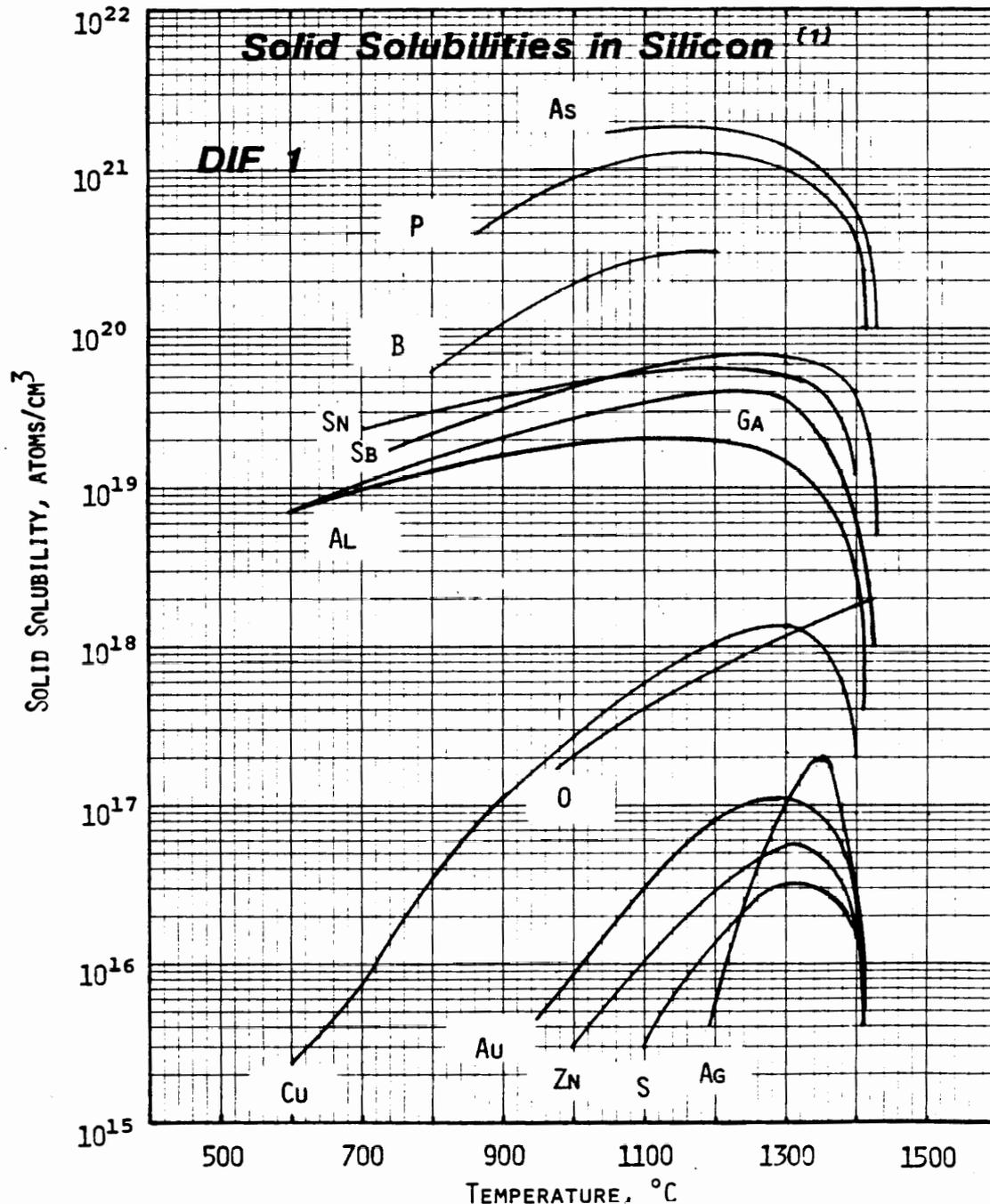
- où
- erfc est la fonction erreur complémentaire,
 - D_1 le coefficient de diffusion qui suit la loi d'Arrhénius en fonction de la température,
 - c_s la solubilité limite de l'impureté à la température de diffusion donnée pour le silicium,
 - t_1 le temps de prédépôt.

L'allure des profils obtenus pour différentes valeurs du paramètre $2\sqrt{D_1 t_1}$ est:

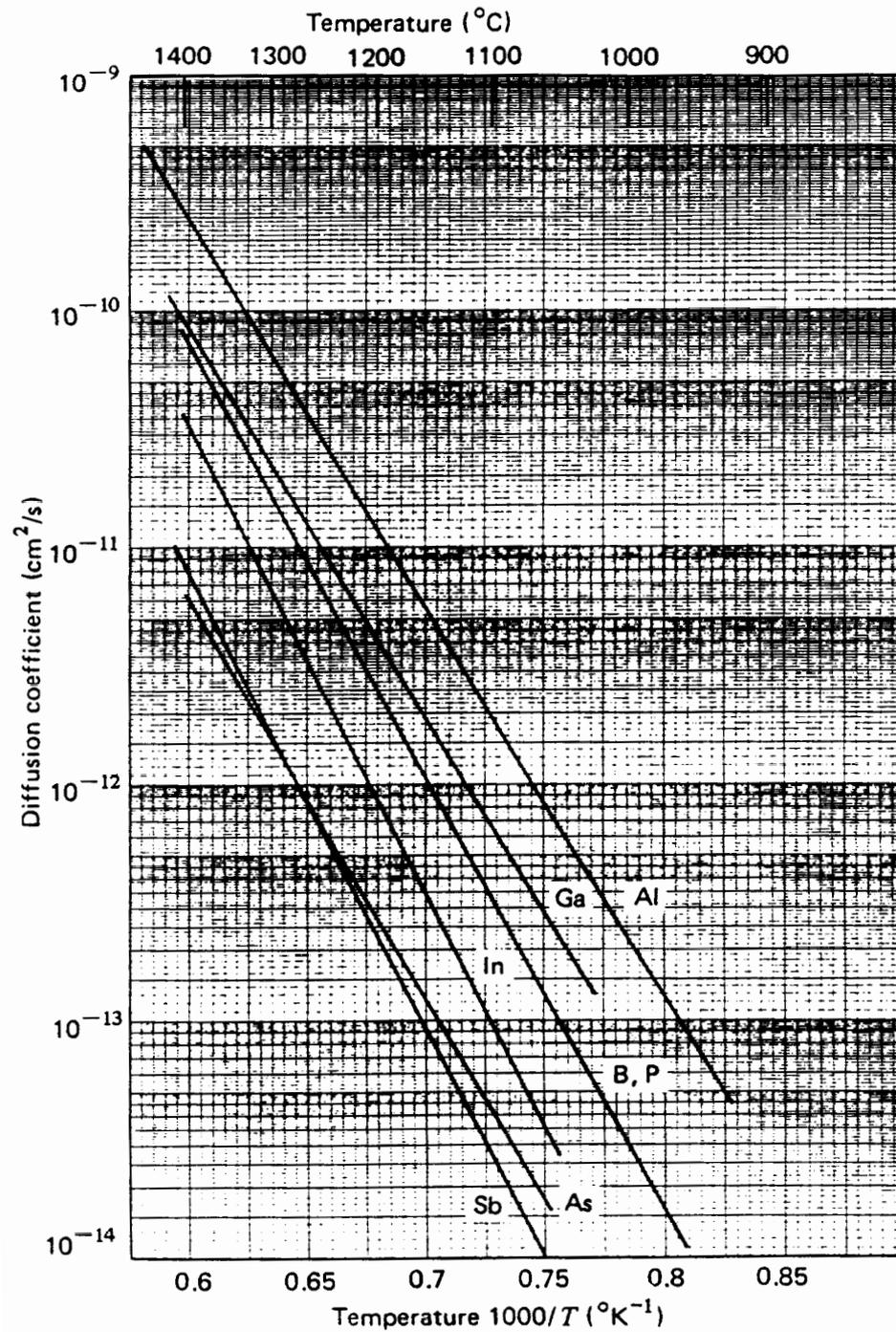


Sachant que le prédépôt est réalisé à une température de l'ordre de 1000°C pendant environ une heure, le dopant diffuse de la surface vers le coeur de la plaquette sur une profondeur de l'ordre du micron. La quantité d'impuretés introduite dans le silicium par unité de surface pour un temps t_1 est alors :

$$Q(t_1) = 2c_s \sqrt{\frac{D_1 t_1}{\pi}}$$



Solubilités limites de différents composants dans le silicium en fonction de la température

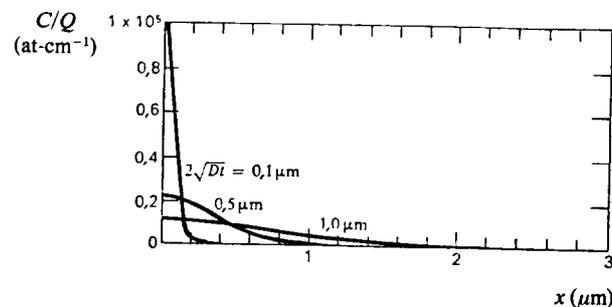


Coefficients de diffusion moyens pour différents composant substitutionnels dans le silicium en fonction de la température

- la seconde étape est la **redistribution** ; les plaquettes, soustraites à toute source de dopant, subissent un long traitement thermique destiné à faire pénétrer plus profondément les impuretés introduites au cours de la première étape. La nouvelle distribution des impuretés obéit à la loi de diffusion à source d'impuretés limitée (et constante) qui est une gaussienne :

$$c(x, t_2) = \frac{Q}{\sqrt{\pi D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 D_2 t_2}\right) \text{ où } Q \text{ est la densité initiale de charges par unités de surface, soit la quantité totale d'impuretés en cm}^{-2} \text{ dans la couche de prédépôt supposée de taille très mince.}$$

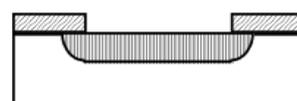
L'allure des profils obtenus après redistribution est la suivante:



Il apparaît une diffusion latérale des impuretés lors de la redistribution due au caractère isotropique de la diffusion. Ceci impose de contrôler la profondeur de la jonction et donc le temps de diffusion pour ne pas avoir de chevauchement latéral des zones diffusées.



localisation des impuretés
après le prédépôt



localisation des impuretés
après la redistribution

Un contrôle de la diffusion effectuée pourra se faire en mesurant la résistance carrée qui caractérise la couche par son dopage et sa profondeur à l'aide de la méthode des quatre pointes. La profondeur de jonction x_j peut être mesurée par "la méthode du biseau". L'échantillon dopé est poli en biseau, la jonction est alors testée électriquement par mesure locale de la résistance (spreading resistance). La méthode est destructive.

Les dopants utilisés sont les suivants : type p : bore, aluminium, gallium, indium et type n : phosphore, arsenic, antimoine, lithium. Le choix pratique se restreint en fonction de plusieurs considérations :

- la solubilité limite des impuretés dans le silicium doit être la plus élevée possible. Les plus performants sont P, B, As avec 10^{20} à 10^{21} atomes/cm³,

- l'aptitude du dopant à se localiser dans le silicium plutôt que dans la silice. Cette aptitude est mesurée par le coefficient de ségrégation m qui représente le rapport des concentrations dans le silicium et l'oxyde à l'équilibre. P et As ont un coefficient de ségrégation de 10 contre 0,3 pour B.

L'IMPLANTATION IONIQUE

L'implantation ionique tend à remplacer systématiquement la diffusion par prédépôt. Elle permet d'introduire des impuretés dans un substrat grâce à l'énergie cinétique qui leur est fournie dans un accélérateur (implanteur).

L'avantage principal de cette technique est le contrôle précis du nombre d'ions implantés par un système extérieur au semi-conducteur et non par les propriétés physiques du substrat, ce qui permet un meilleur contrôle de la précision des profils d'impuretés.

L'inconvénient majeur est que ce procédé crée des défauts inhérents à la technique employée : création de dislocation dans le réseau cristallin sous l'impact des particules ioniques énergétiques. Cet endommagement est maintenant guéri par recuit thermique à basse température. L'ensemble des avantages de cette technique ajouté à son caractère anisotropique font qu'elle est préférée à la diffusion thermique notamment pour les circuits à haute densité d'intégration.

Description de l'implanteur ionique :

L'implanteur ionique est un accélérateur de particules composé (i) d'une chambre de ionisation (source) dans laquelle un corps contenant l'élément à implanter (un mélange arsine 10%, phosphine 10%, néon 80% pour l'implantation soit de l'arsenic, du phosphore ou du néon) est amené à l'état de plasma, (ii) d'un étage d'accélérateur, (iii) d'un étage de déflexion magnétique qui agit en séparateur de masse (dans un champ magnétique B , un ion de masse M et de charge Q décrit une trajectoire circulaire de rayon $R = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2VM}{Q}}$ où

V est la tension d'extraction $\approx 25\text{kV}$) et permet d'éliminer les produits non désirables (arsenic et néon pour n'implanter que le phosphore), (iv) d'une déflexion électrostatique du faisceau d'ions qui permet de balayer le faisceau d'ions sur l'échantillon de manière homogène, et (v) de la chambre de cible, où se trouve les plaques de silicium. Les énergies d'implantation sont de l'ordre de 15 à 200keV

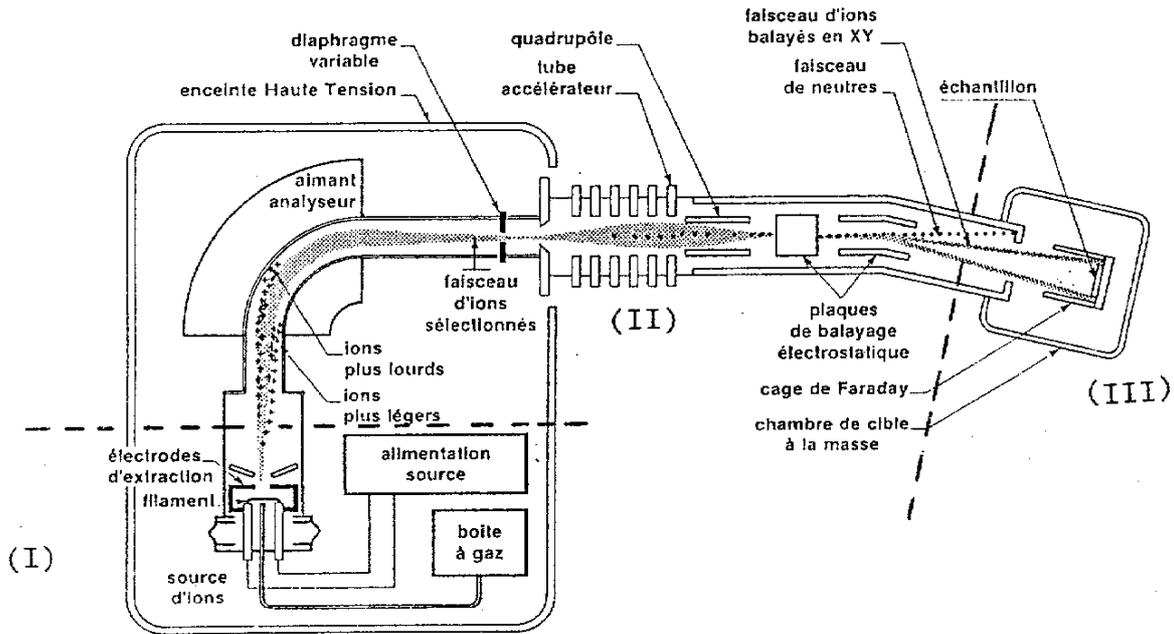


Schéma synoptique de l'implanteur ionique.

Profil de distribution des atomes implantés :

Les ions accélérés par l'implanteur vont pénétrer le silicium jusqu'à une certaine profondeur. La décélération de l'ion aboutissant à son arrêt à une certaine profondeur se fait par interaction avec les atomes du réseau cristallin et avec les électrons présents dans le cristal. Le profil de concentration des impuretés implantées est en première approximation gaussien, le sommet de la courbe étant situé à l'intérieur du substrat à une profondeur égale à la pénétration moyenne des ions, notée R_p (fig.). La largeur de cette distribution des impuretés est décrite par un écart moyen ΔR_p . Le profil d'implantation peut donc être décrit par la relation :

$$c(x) = c_p \cdot \exp \left[- \frac{(x - R_p)^2}{2 \cdot \Delta R_p^2} \right]$$

où c_p est la concentration au pic de la gaussienne.

L'intégrale du dopant sous cette courbe nous donne la quantité totale implantée, ce qui permet de relier c_p (exprimé en cm^{-3}) à la dose implantée N (exprimée en cm^{-2}) :

$$c_p = \left[\frac{N}{\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot \Delta R_p} \right]$$

La dose implantée est donnée par la relation :

$$N = \frac{1}{ZeS} \int_0^{t_1} I(t) dt$$

avec

Z le nombre de charges,

S l'aire implantée,

t_1 le temps d'implantation

I le courant du faisceau (de l'ordre du mA).

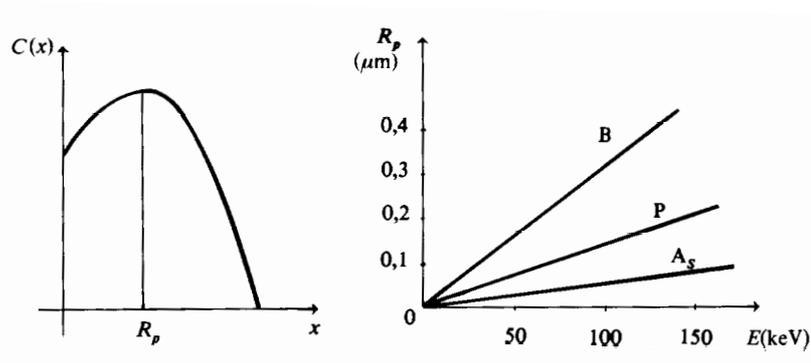
Cependant, ces équations ne sont applicables que dans le cas de l'implantation dans un matériau amorphe.

Ainsi, dans le cas de monocristaux, on approxime de façon empirique les valeurs de R_p et de ΔR_p (exprimés en nanomètres) en fonction de l'énergie d'implantation, E (exprimé en keV). Pour l'implantation de phosphore dans du silicium monocristallin, on trouve :

$$R_p = 1,23612 \times E^{1,0000}$$

et

$$\Delta R_p = 0,76046 \times E^{0,8287}$$



Diffusion des dopants :

Après toute étape d'implantation, il est bon d'opérer un recuit thermique qui va restaurer la structure cristalline du silicium et permettre aux impuretés implantées de s'introduire en position interstitielle et, donc, de devenir électriquement actives. Cette étape de diffusion thermique (800 à 1000°C) des dopants conduit à un étalement du profil gaussien obtenu par implantation. La quantité totale d'atomes d'impureté reste constante et la nouvelle distribution est alors elle aussi gaussienne.

La position du pic de concentration, R_p , reste inchangée mais pas l'étalement de la distribution ainsi que la valeur du pic de concentration.

Le profil de dopage final est alors :

$$c(x,t) = c_p \cdot \exp\left[-\frac{(x - R_p)^2}{L^2}\right]$$

avec $L = \sqrt{2 \cdot \Delta R_p^2 + 4Dt}$ et $c_p = \frac{N}{L \sqrt{\pi}}$

LA MESURE R CARREE

LA METHODE DES 4 POINTES :

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). Toutefois, la mesure de résistivité pour les couches métalliques ne sera pas effectuée par la méthode 4 pointes en contact car ces dernières seraient contaminées. On prendra soin alors, si l'on souhaite effectuer la mesure pour la couche de métal, de la faire par la méthode inductive.

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.



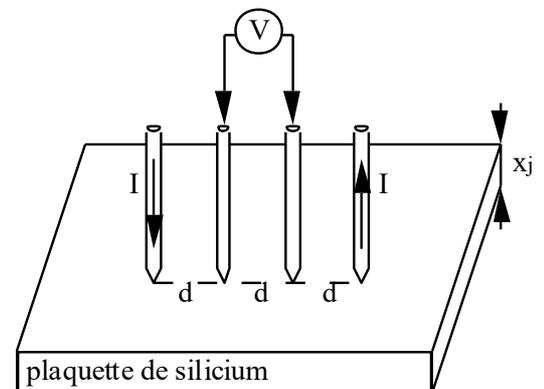
De R_{\square} on peut alors tirer la valeur de la résistivité ρ en ohm.cm, connaissant son épaisseur e :

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

PRINCIPE EXPERIMENTAL DE LA METHODE 4 POINTES ALIGNEES:

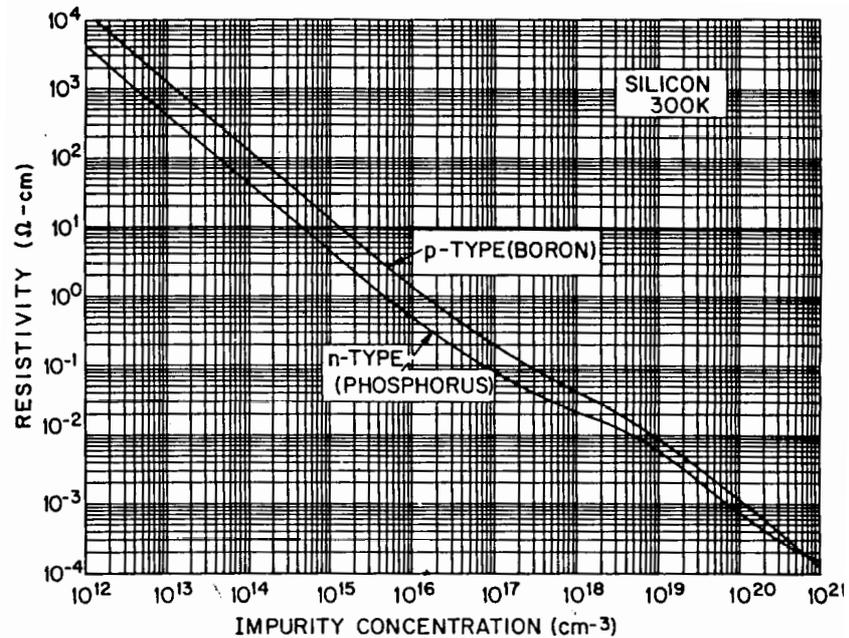
Cette méthode consiste à faire passer un courant I entre les deux pointes extrêmes de quatre pointes alignées équidistantes (en général en tungstène) qui sont appliquées sur la surface de l'échantillon. La mesure de la tension aux bornes des deux pointes centrales permet de déterminer la résistance carrée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

$$R_{\square} = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} = 4,53 \frac{V}{I}$$



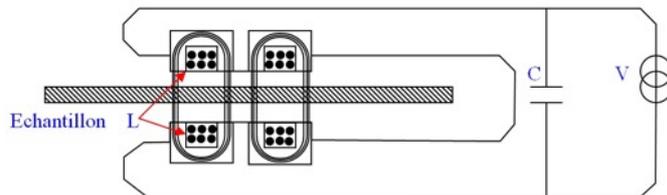
Cette technique n'est applicable que sur un échantillon de résistivité homogène.

Ce procédé permet de contrôler soit la résistivité initiale du substrat, soit la résistivité des zones diffusées (la détermination de l'épaisseur de la zone étant faite par ailleurs) et à l'aide de la courbe ci-contre, on peut déduire le dopage de la zone diffusée.



PRINCIPE THEORIQUE DE LA METHODE 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 permet d'effectuer 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:

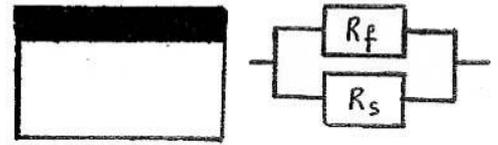
$$\rho(\Omega.cm) = R_{\square}(\Omega).e(cm).$$

Par contre si la résistivité varie avec l'épaisseur (couche mince et substrat de résistivités différentes, ou bien gradient de concentration de dopant), le système déduira de la puissance

dissipée dans toute l'épaisseur de l'échantillon la résistance carrée totale R_t à partir 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:

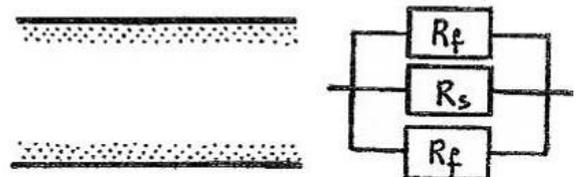
$$R_t = \frac{R_f \cdot R_s}{R_f + R_s}$$



Si R_f est petit devant R_s alors $R_t \sim R_f$ et $\rho_f \sim R_t \cdot e_f$.

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), deux cas se présentent :



(i) 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.

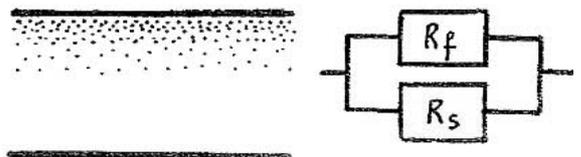
$$\frac{1}{R_t} = \frac{2}{R_f} + \frac{1}{R_s}$$

si $R_s \gg R_f$

$$\text{alors } R_t = \frac{R_f}{2}$$

$$\text{et } \rho_f = 2R_t \cdot e_f$$

(ii) 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 ŒUVRE DE LA METHODE DES 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
- entrer les paramètres de mesure (V_{limit} , 100, enter ; I_{source} , $100 \cdot 10^{-3}$, enter ; I_{limit} , $100 \cdot 10^{-3}$, 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)
- faire la mesure (injection du courant) : « Output operate »
- lire la mesure
- désactiver la mesure (output operate) avant de relever les pointes
- faire au moins 3 mesures avec trois valeurs différentes du courant (1-10-100) pour vérifier l'ohmicité du contact

TRAVAIL A REALISER

- ➔ Etude du substrat utilisé pour la réalisation de la structure MOS
Mesure de la résistance carrée R_{\square} et calcul de la résistivité.
En déduire le dopage.

L'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, et l'onde n , normale au plan d'incidence.

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 $\Psi = \arctan \frac{A_p}{A_n}$
- Δ est le déphasage entre les deux ondes n et p , $\Delta = \theta_p - \theta_n$

De la mesure de Δ et Ψ il est possible de déduire l'épaisseur e et l'indice n de la couche diélectrique à l'aide d'un abaque.

PRATIQUE :

Pour des raisons de commodité, on préfère, pour mesurer Δ et Ψ envoyer sur l'échantillon une lumière polarisée elliptiquement 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 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,
- un porte échantillon,
- un analyseur 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 la lumière émergente en agissant sur :

- l'orientation du polariseur 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 qui doit assurer l'extinction de la lumière émergente.

Ces deux réglages sont convergents. Il y a en principe 16 couples d'orientation relative analyseur/polariseur 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.

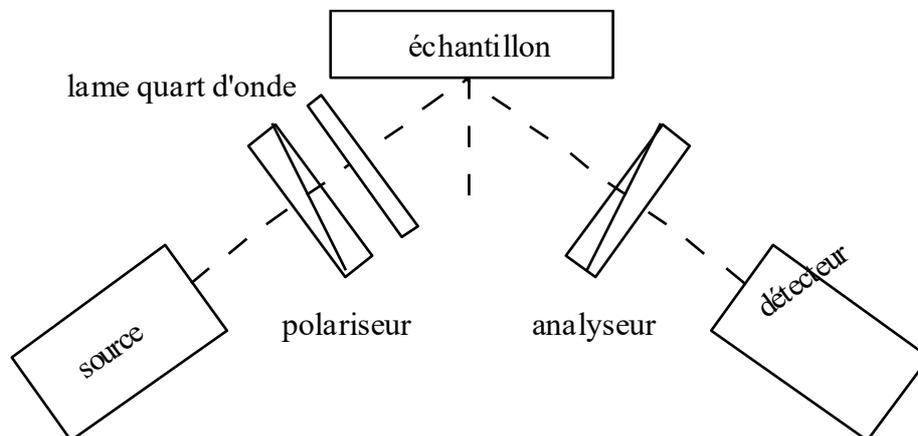


Schéma synoptique de l'ellipsomètre.

TRAVAIL A EFFECTUER : ETUDE OPTIQUE DE LA COUCHE D'OXYDE

On se propose d'étudier par ellipsométrie:

- i. un oxyde élaboré sur Si <100> dans les mêmes conditions que celles utilisées pour élaborer le circuit MOSTEC (plaquette témoin)
- ii. une série d'oxyde « humides » élaborés sur Si <111> en présence de vapeur d'eau avec des durées d'oxydation croissantes.

Ainsi, pour chaque échantillon, mesurer par ellipsométrie la valeur de l'indice n et de l'épaisseur e .

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.

Au vu de ces résultats:

- déterminer l'épaisseur de l'oxyde de grille.
- pour la série d'oxydes « humides », 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. Comparer l'oxydation sèche et l'oxydation humide. Noter l'évolution de la couleur avec l'épaisseur d'oxyde (observation en incidence normale).

LE MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE

GENERALITE:

Le microscope électronique à balayage (*MEB*) ou *SEM* pour Scanning Electron Microscope est relativement récent dans la famille des microscopes (milieu des années 30 par Max Knoll) et constitue un complément du microscope optique (*MO*) ou électronique à transmission (*MET*) plus anciens.

Avec leurs avantages et leurs inconvénients, chaque type de microscope couvre un domaine spécifique d'applications. Par exemple, le *MO* est idéal pour les observations d'objets où le pouvoir de résolution et la profondeur de champ ne sont pas critiques. Le *MET* est indispensable pour les observations à haut pouvoir de résolution. Cependant, les échantillons doivent être amincis à une épaisseur maximale d'une dizaine de nanomètres et cette limitation est intrinsèque au principe de fonctionnement du *MET*.

Le *MEB* offre un pouvoir de résolution intermédiaire entre le *MO* et le *MET* et l'observation d'échantillon massif ne pose pas de problème. De plus, la profondeur de champ est suffisamment grande pour permettre des observations en trois dimensions.

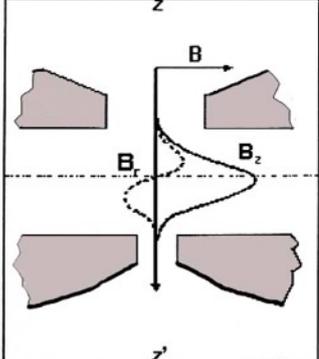
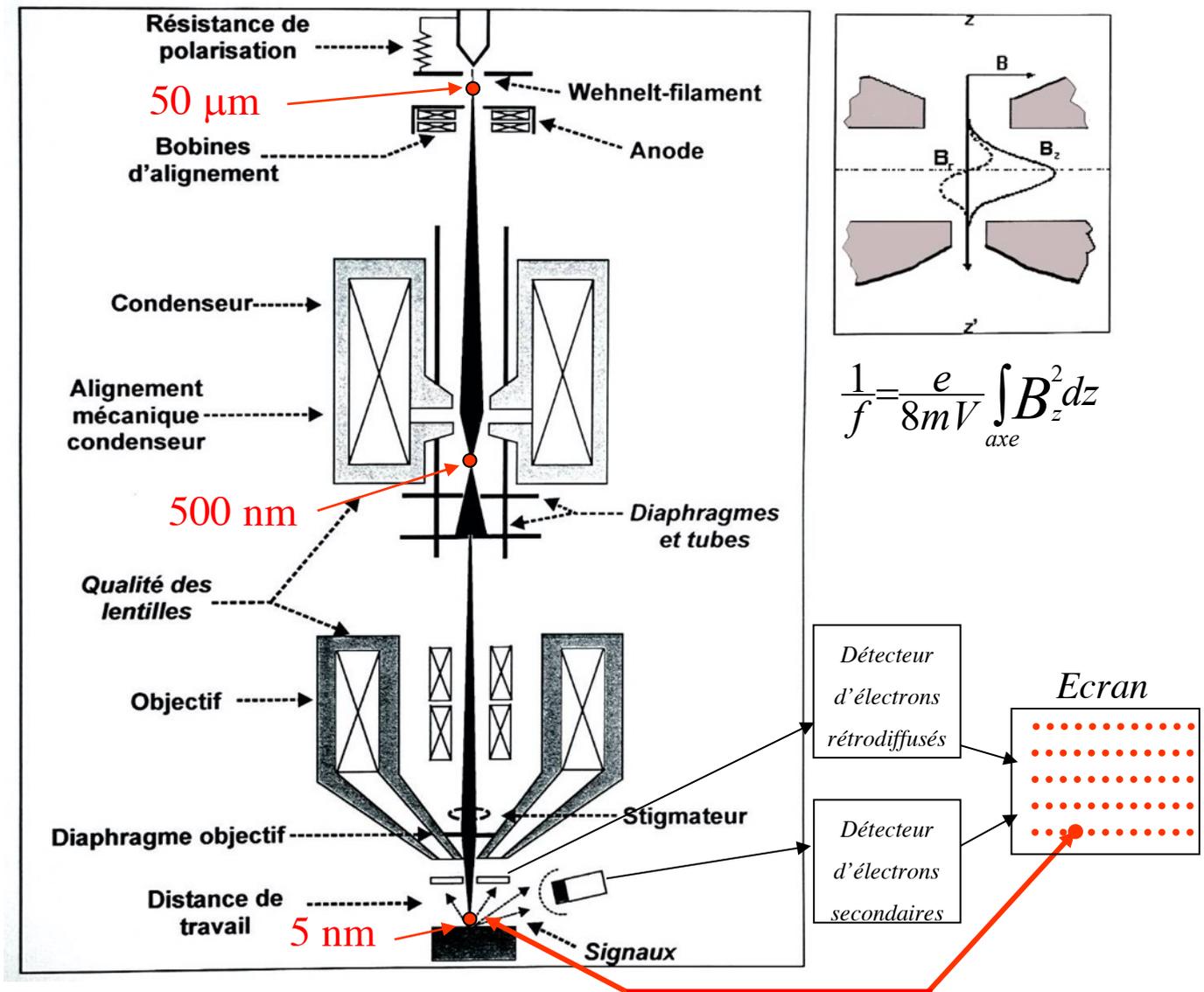
PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT:

Un faisceau d'électrons est émis par le canon à électrons, puis est concentré et focalisé sous un vide élevé dans la colonne du *MEB*. Ce faisceau balaye l'échantillon. Lorsque le faisceau rencontre le spécimen, certains électrons sont rétrodiffusés, d'autres provoquent l'éjection d'électrons secondaires de basses énergie (environ 50eV) issus des couches supérieures des atomes, alors que certains autres produisent des rayons *X*. Ces signaux sont analysés par des détecteurs puis envoyés, via un amplificateur, vers l'écran de contrôle. La synchronisation du balayage électronique de l'échantillon avec celui de l'écran permet d'obtenir une image « par balayage ». Lorsque les électrons secondaires sont utilisés pour former l'image, le contraste de celle-ci traduit la topographie de l'échantillon

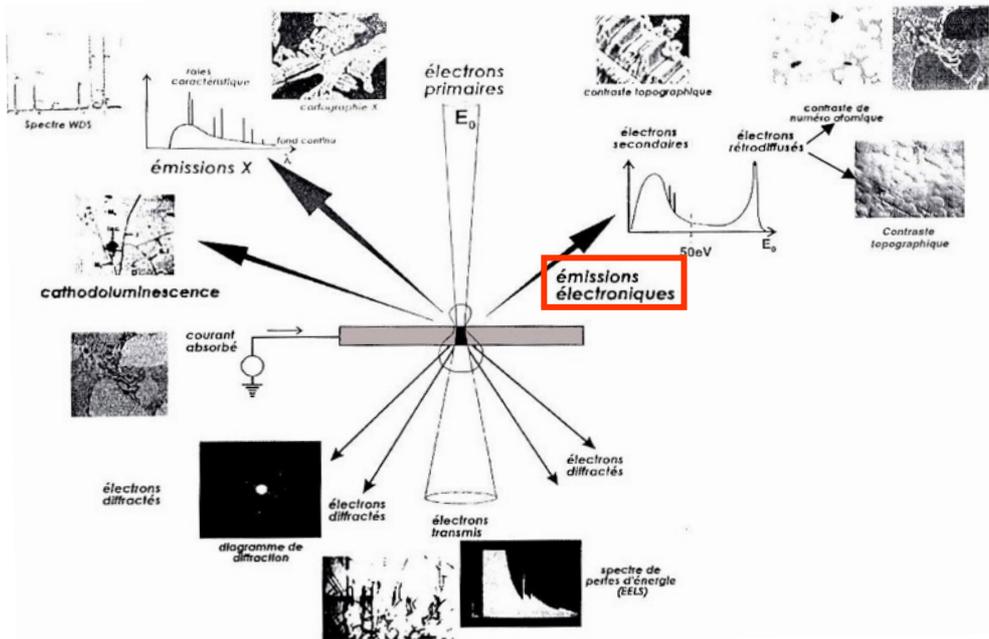
Le grossissement est déterminé par le rapport de la surface balayée sur l'échantillon à la surface de l'image reproduite sur l'écran cathodique. Ce grossissement peut varier dans un très large éventail allant de $\times 20$ à $\times 10^5$ environ. La résolution de l'image est directement liée au diamètre du faisceau d'électrons utilisé pour balayer la surface de l'échantillon. Ce diamètre est ajustable et conditionne également l'intensité. Cette résolution est voisine de 10 nm dans le meilleur des cas (contre 1 nm dans le cas du *MET*). Par contre l'image du *MEB* a une grande profondeur de champ (intervalle des distances objets pour lesquelles l'image est assez bien focalisée). Par exemple, avec un diamètre de faisceau de 50 nm (à

×1000), la profondeur de champ est de 50 μm, c'est-à-dire 100 fois plus que celle d'un MO de même grossissement. Le MEB produit donc un effet pratiquement tridimensionnel.

LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU MEB : FORMATION DE L'IMAGE



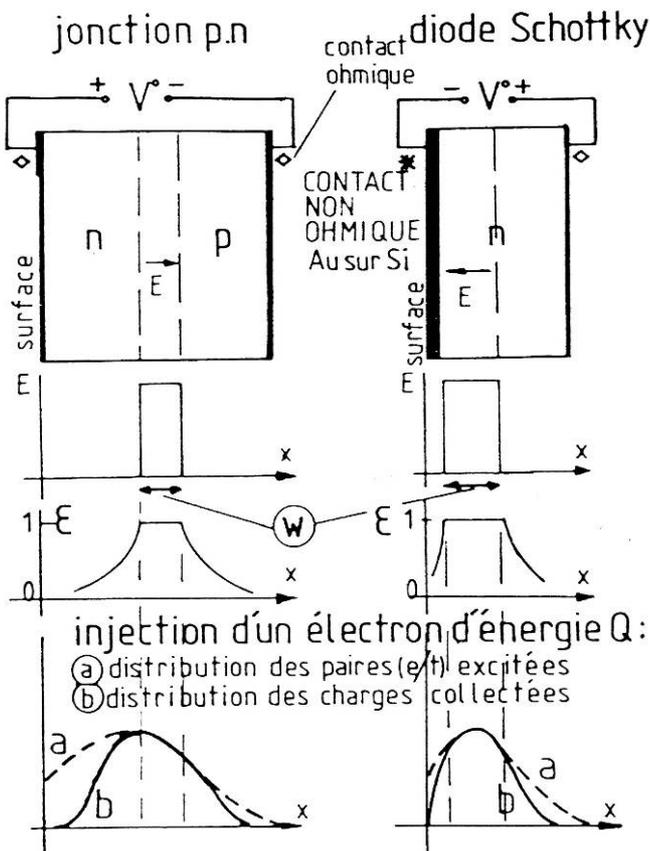
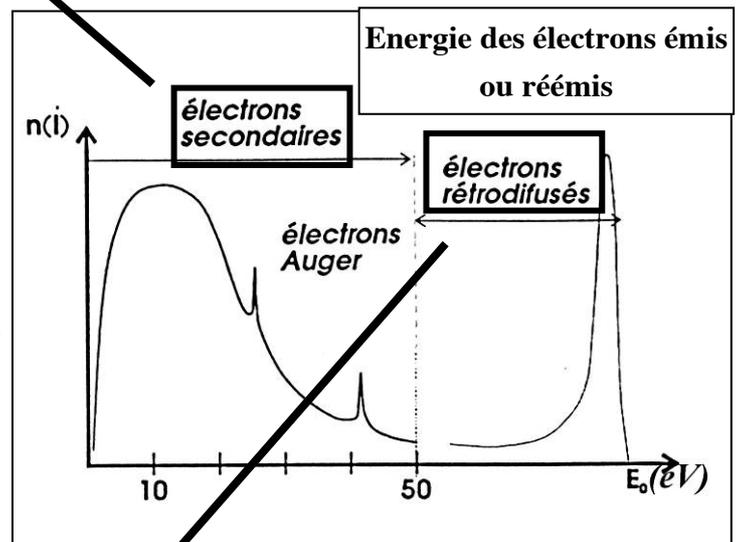
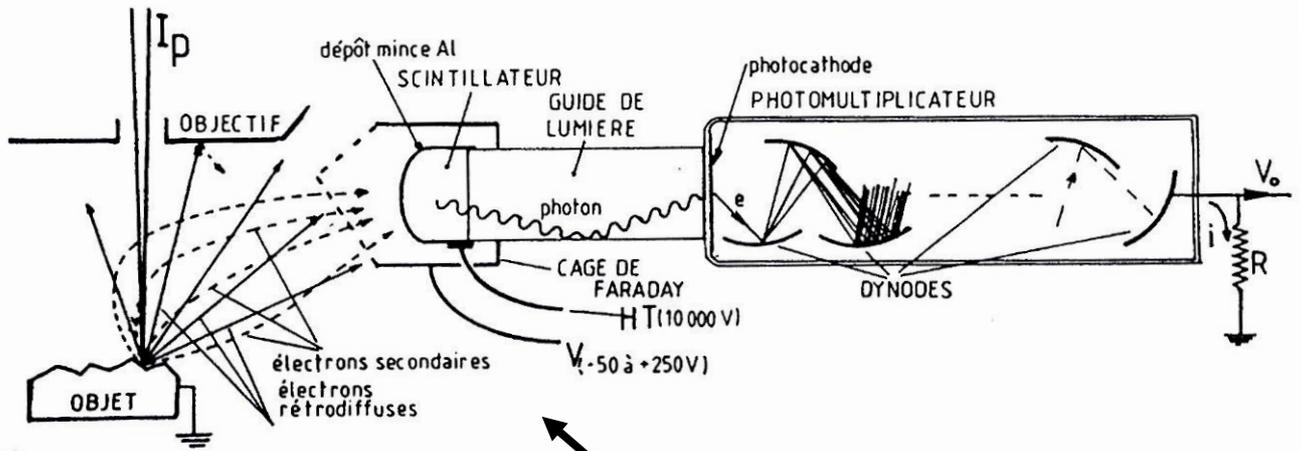
$$\frac{1}{f} = \frac{e}{8mV} \int_{axe} B_z^2 dz$$



LES DIFFERENTS TYPES DE DETECTEURS

(i) Détecteur d'électrons secondaires : le détecteur d'Everhart

Ce type de détecteur est un « aspirateur » d'électrons de faible énergie

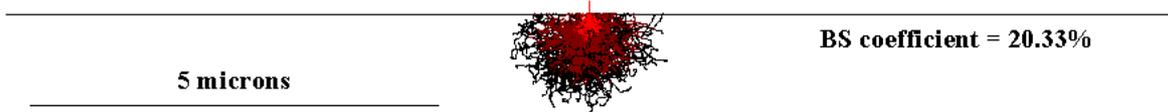


(ii) Détecteur d'électrons rétrodiffusés : le détecteur à 1/2 conducteur

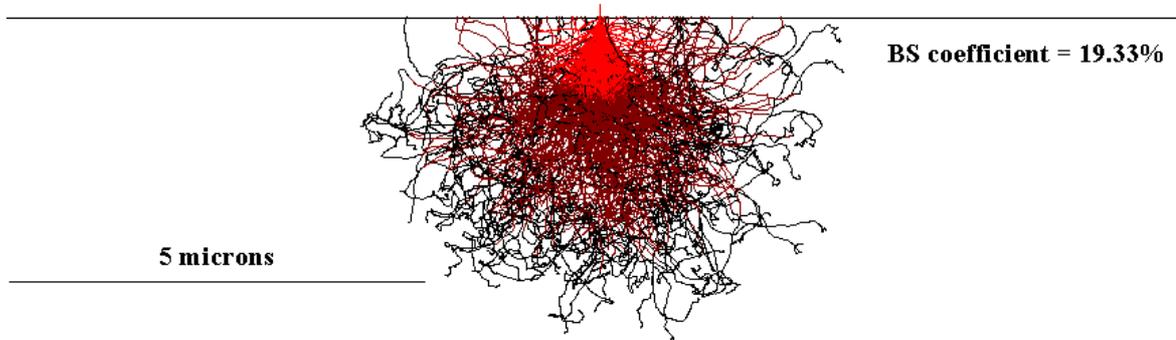
Ce type de détecteur permet de détecter les électrons de forte énergie

MODELISATION DE LA TRAJECTOIRE DES ELECTRONS DANS LE MATERIAU PAR SIMULATION DE MONTE CARLO

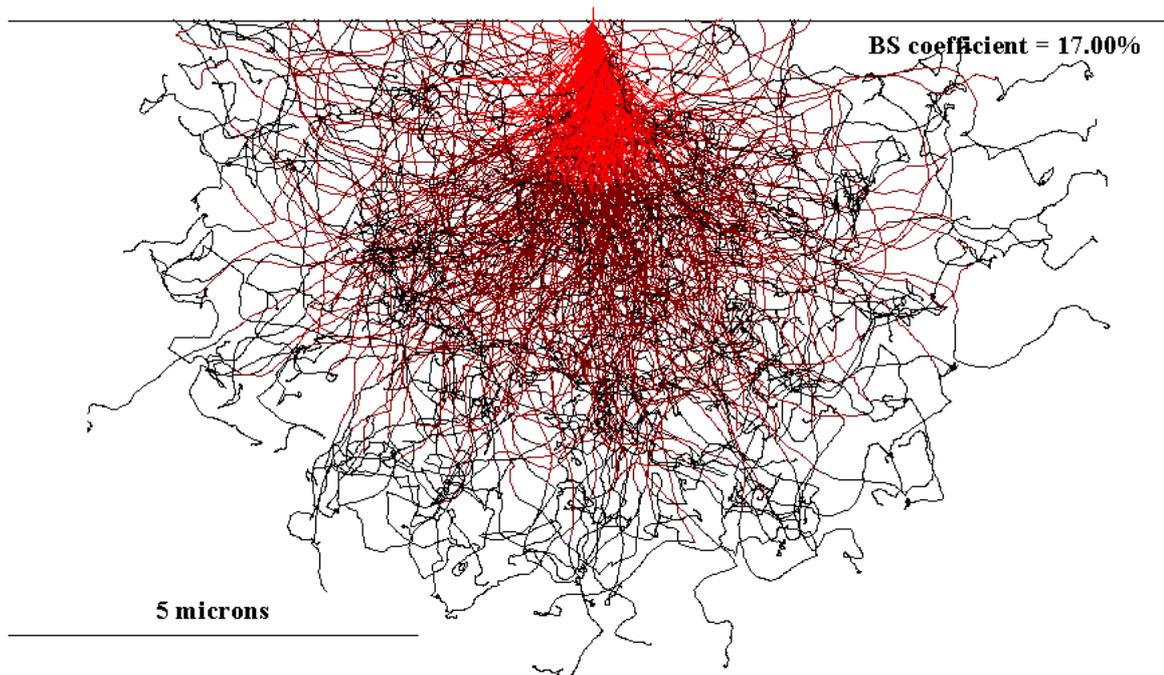
Nous avons modélisé ici au moyen d'une simulation de Monte Carlo la trajectoire des électrons incidents (issus du faisceau d'électrons) dans le silicium pour trois énergies différentes : 10eV, 20eV et 30eV.
Eo[kV]=10; Z=14; W=28.0855; Rho[g/cc]=2.34; Tilt(deg)=0; Traj.No.=300



Eo[kV]=20; Z=14; W=28.0855; Rho[g/cc]=2.34; Tilt(deg)=0; Traj.No.=300



Eo[kV]=30; Z=14; W=28.0855; Rho[g/cc]=2.34; Tilt(deg)=0; Traj.No.=300



Réalisation de l'Oxyde de Protection

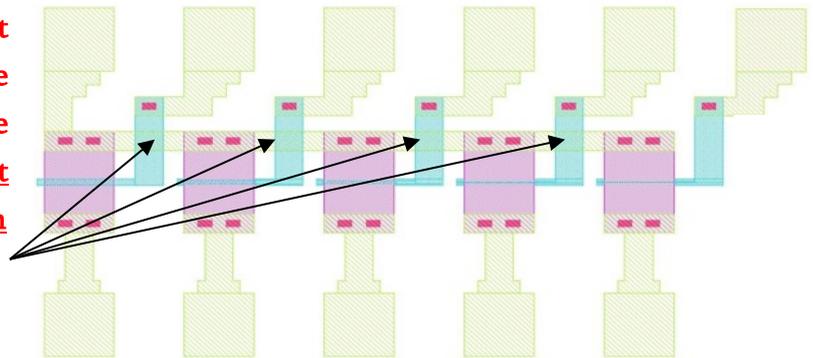
REALISATION DE L'OXYDE DE PROTECTION

ISOLATION DES GRILLES PAR RAPPORT A LA SOURCE COMMUNE - OPTIONNEL

• Dépôt *CVD* du SiO_2

Cette étape ne sera pas effectuée par les élèves étant donné qu'elle n'apporte aucune nouveauté technologique ; de plus, elle utilise du silane, gaz dangereux.

Cet oxyde d'isolement n'est nécessaire que si l'on souhaite réaliser les transistors à source commune, afin d'isoler le contact aluminium des grilles en silicium poly cristallin



Cet oxyde d'isolement est déposé par dépôt chimique en phase vapeur à une température d'environ 420°C (*LTO* Low Temperature Oxyde) à partir de silane et d'oxygène à une pression totale de 0,2 Torr. Cette faible température permet de « geler » la diffusion des dopants précédemment introduits dans le substrat et de conserver ainsi les profils préalablement définis.

• Photolithographie des trous de contact. (masque de niveau 5)

• Gravure du *LTO*

Le *LTO* est gravé par voie humide (solution de HF). Un brassage intermittent de la solution par ultrasons est nécessaire de manière à décaper correctement l'oxyde au fond des trous de contact qui sont de dimensions très réduites.

• Retrait de la résine

La résine est retirée par voie humide.

Réalisation des Contacts

REALISATION DES CONTACTS

Cette séance comporte deux étapes technologiques: la métallisation et la photolithographie du niveau 6 avec gravure humide de l'aluminium.

- Nettoyer les plaques
- dépôt d'aluminium soit par pulvérisation cathodique soit par évaporation par effet joule

Dépôt d'aluminium par pulvérisation cathodique : une cathode en aluminium est bombardée par des ions argon. Les atomes d'aluminium ainsi expulsés viennent se déposer sur le substrat.

Dépôt d'aluminium par évaporation :

Dans le cadre de l'évaporation, déterminer la masse d'aluminium nécessaire pour obtenir une épaisseur d'aluminium de 4000Å, sachant que les substrats sont à une hauteur de 30 cm et excentrés de 0 à 5 cm suivant le point d'impact. Déterminer l'écart sur l'épaisseur obtenue suivant le point considéré sur la plaquette.

• **Photolithographie de niveau 6**. Attention, la couche supérieure étant de l'aluminium, il ne faut pas déposer d'accroche avant d'étaler la résine

• **Gravure humide de l'aluminium** :

- préparation du mélange d'attaque (préchauffage ~ 30 min à 40°C, *le prévoir à l'avance*)
- gravure ($\approx 1'30''$: jusqu'à ce que les circuits soient visibles), rinçage et séchage
- contrôle visuel au microscope

• **Gravure humide de la résine** : 1 min 30s dans le remover

• **Test du motif alphastep** - Mesurer les différentes épaisseurs de couche (aluminium, oxyde mince, LTO, SiPoly) et comparer avec les résultats déjà obtenus. C'est à vous de déterminer le profil du motif alphastep à l'aide des différents masques fournis.

LA 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 (qui permettent de relier le circuit intégré au monde extérieur) et les interconnexions (qui relient certains composants entre eux). La métallisation intervenant en fin de fabrication, la surface de la plaquette est très irrégulière (en raison de toutes les étapes précédentes, il existe de nombreuses marches d'oxyde de plusieurs milliers d'Angströms, des trous profonds, réalisés pour les prises de contact, ...). Le dépôt métallique, pour recouvrir parfaitement toute la surface, doit donc être relativement épais, de l'ordre de 5000 à 8000Å.

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

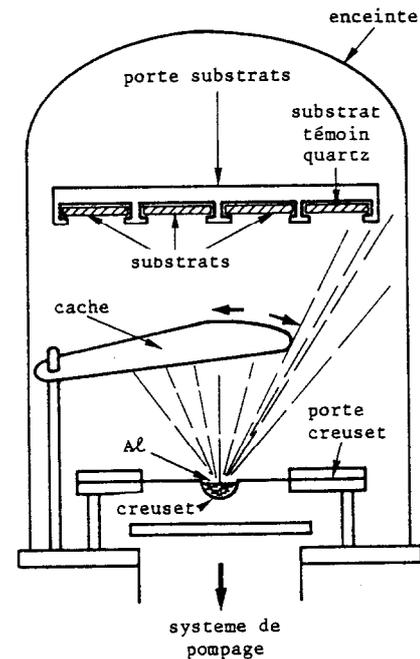
- l'ohmicité des contacts avec le silicium quel que soit son dopage,
- l'adhésion de la couche de métal sur le silicium ou sur la silice, même après gravure,
- le métal doit pouvoir être facilement gravé par les procédés courants de lithographie,
- les irrégularités du circuit doivent pouvoir être recouvertes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

Le métal qui offre le meilleur compromis pour toutes ces exigences est l'aluminium ($\rho=2,7\mu\Omega.cm$ à 300K). Le dépôt de l'aluminium sur les plaquettes de silicium peut se faire soit par évaporation sous vide, soit par pulvérisation cathodique.

EVAPORATION SOUS VIDE

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) 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 l'ordre de 10^{-4} torr). L'évaporation se fait dans toutes les directions ; lorsque les atomes arrivent sur des surfaces froides (parois de l'enceinte, plaquette de silicium), ils vont se condenser et former un film stable si les paramètres de l'évaporation sont correctement choisis (température des substrats, vitesse des particules, pression dans l'enceinte...).

Un cache, que l'on peut actionner, permet de ne mettre en contact les substrats et les molécules projetées à grande vitesse que lorsque le régime permanent de l'évaporation est atteint. L'uniformité du dépôt est obtenue en disposant les plaquettes sur un support animé d'un mouvement de rotation planétaire autour de sa 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 l'épaisseur d'aluminium.



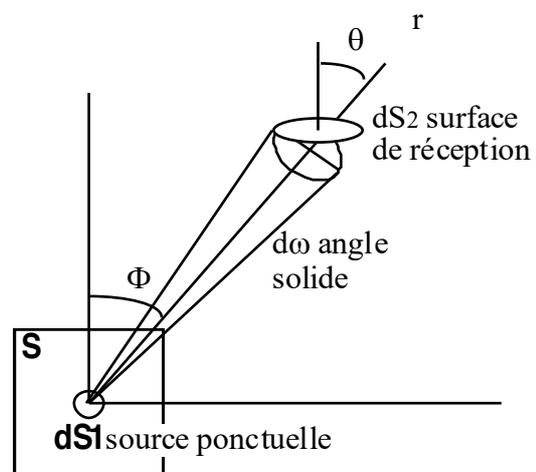
Bâti d'évaporation sous vide.

Quantité de métal nécessaire pour une évaporation

Soit une petite sphère dS_1 de matériau qui s'évapore dans toutes les directions avec un taux m (en g/s). Ce type de source peut être assimilé à une source ponctuelle. Soit dS_2 la surface de réception du matériau qui s'évapore.

La part de matériau qui passe dans l'angle solide $d\Omega$ dans la direction Φ par unité de temps

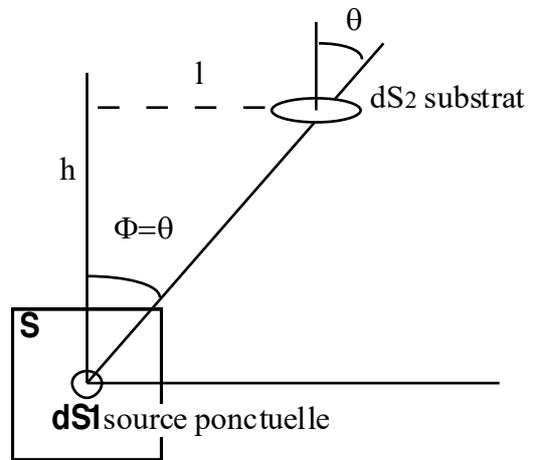
$$\text{est } dm = \frac{m}{4\pi} d\omega$$



Par contre, si le matériau ne s'évapore que dans un demi-plan, alors $dm = \frac{m}{\pi} \cos \Phi d\omega$. Le matériau arrive sur la petite surface dS_2 , l'angle solide à considérer est donc $d\omega = \frac{dS_2 \cos \theta}{r^2}$ et on obtient $dm = \frac{m}{\pi} \cos \Phi \frac{\cos \theta}{r^2} dS_2$ pour la source considérée ponctuelle. D'autre part, si le matériau a une densité ρ_d (g/cm³) et que l'épaisseur déposée par unité de temps est e (cm/s), le volume de matériau déposé sur dS_2 est $e \cdot dS_2$ et on a $dm = \rho_d \cdot e \cdot dS_2$ ce qui permet de déduire $e = \frac{m}{\pi \rho_d} \left(\frac{\cos \Phi \cdot \cos \theta}{r^2} \right)$.

Si e est en (cm/s) alors m est en (g/s) mais il est possible de supprimer le temps en mettant e en cm et m en g; la relation relie alors l'épaisseur de la couche à la masse totale évaporée. Si le substrat est dans un plan parallèle à celui de la source et est situé à une hauteur h et excentré de l par rapport à la source alors on obtient

$$e = \frac{m}{\pi \rho_d} \left(\frac{h^2}{(h^2 + l^2)^2} \right).$$

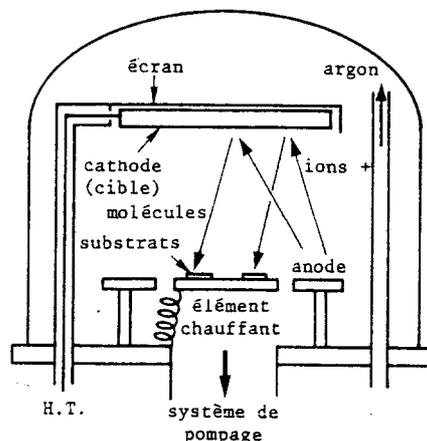


PULVERISATION CATHODIQUE

La pulvérisation cathodique est un procédé de dépôt en phase vapeur. 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, reliée à la masse, supporte les échantillons à métalliser (anode). Les ions positifs contenus dans le plasma sont attirés par la cathode et, en bombardant celle-ci, en expulsent des atomes. Ceux-ci vont se condenser sur les parois de l'enceinte mais aussi sur les échantillons disposés sur l'anode. Les valeurs typiques de vitesses de dépôt sont voisines de quelques centaines d'Angströms par minute.

Les principes physiques à la base de cette technique sont les mêmes que ceux entrant en jeu pour la *RIE*.



Bâti de pulvérisation cathodique.

L'avantage de cette méthode par rapport à l'évaporation 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;
- les dépôts obtenus ont une meilleure adhérence sur les substrats en raison de l'énergie élevée des atomes pulvérisés.

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.

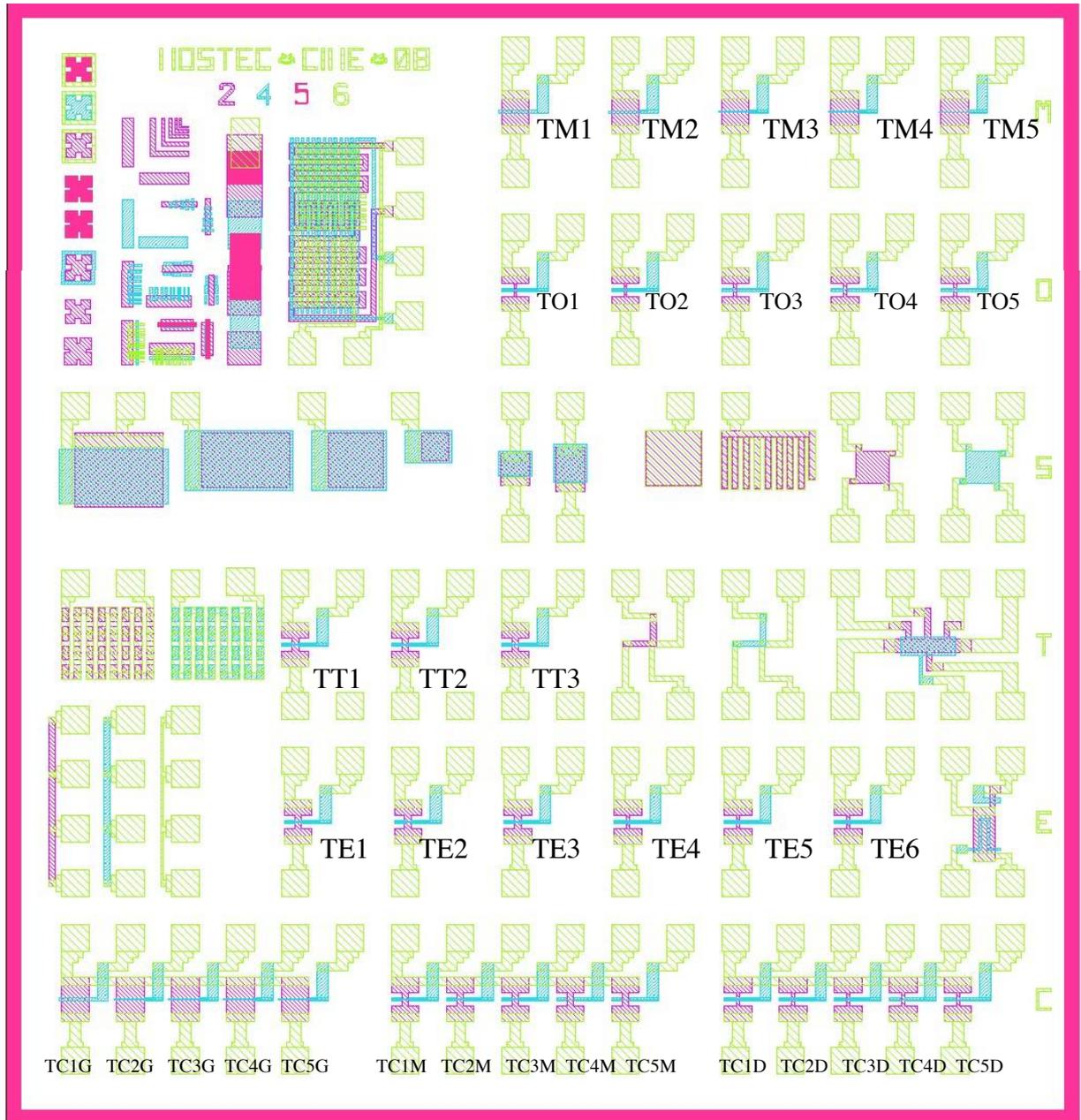
Annexes

ANNEXES

DESCRIPTIFS DU CIRCUIT MOSTEC :

Annexe 1 page 60 :	circuit finalisé niveau 2+4+5+6 superposés	
Annexe 2 page 61 :	masques niveau 2 niveau 4 niveau 5 et niveau 6	
Annexe 3 page 64 :	légende - Croix d'alignements – motif profilomètre	
Annexe 4 page 65 :	tests résolution	
Annexe 5 page 67 :	passage de marches	
Annexe 6-1 page 68 :	capacité MOS ligne S	
Annexe 6-2 page 69 :	diodes ligne S	
Annexe 7 page 70 :	tests électriques ligne S et T : VDP, chaînes de contacts, kelvin	
Annexe 8 page 71 :	tests électriques ligne E : résistances et inverseur enrichi/enrichi	
Annexe 9 page 72 :	transistors ligne M : W=100 μ m ;	L=10 ;6 ;4 ;2 ;1 μ m
Annexe 10 page 73 :	transistors ligne O : W=10 μ m ;	L=6 ;2 ;1 ;0.8 ;0.5 μ m
Annexe 11 page 74 :	transistors ligne T : W=25 μ m ;	L=1 ;0.8 ;0.5 μ m
Annexe 12-1 page 75 :	transistors ligne T : W=25 μ m ;	L=1 ;0.8 ;0.5 μ m
Annexe 12-2 page 76 :	transistors ligne T : W=10 μ m ;	L=1 ;0.8 ;0.5 μ m
Annexe 13-1 page 77 :	transistors ligne C : W=100 μ m ;	L=10 ;6 ;4 ;2 ;1 μ m
Annexe 13-2 page 78 :	transistors ligne C : W=25 μ m ;	L=6 ;2 ;1 ;0.8 ;0.5 μ m
Annexe 13-3 page 79 :	transistors ligne C : W=10 μ m ;	L=6 ;2 ;1 ;0.8 ;0.5 μ m

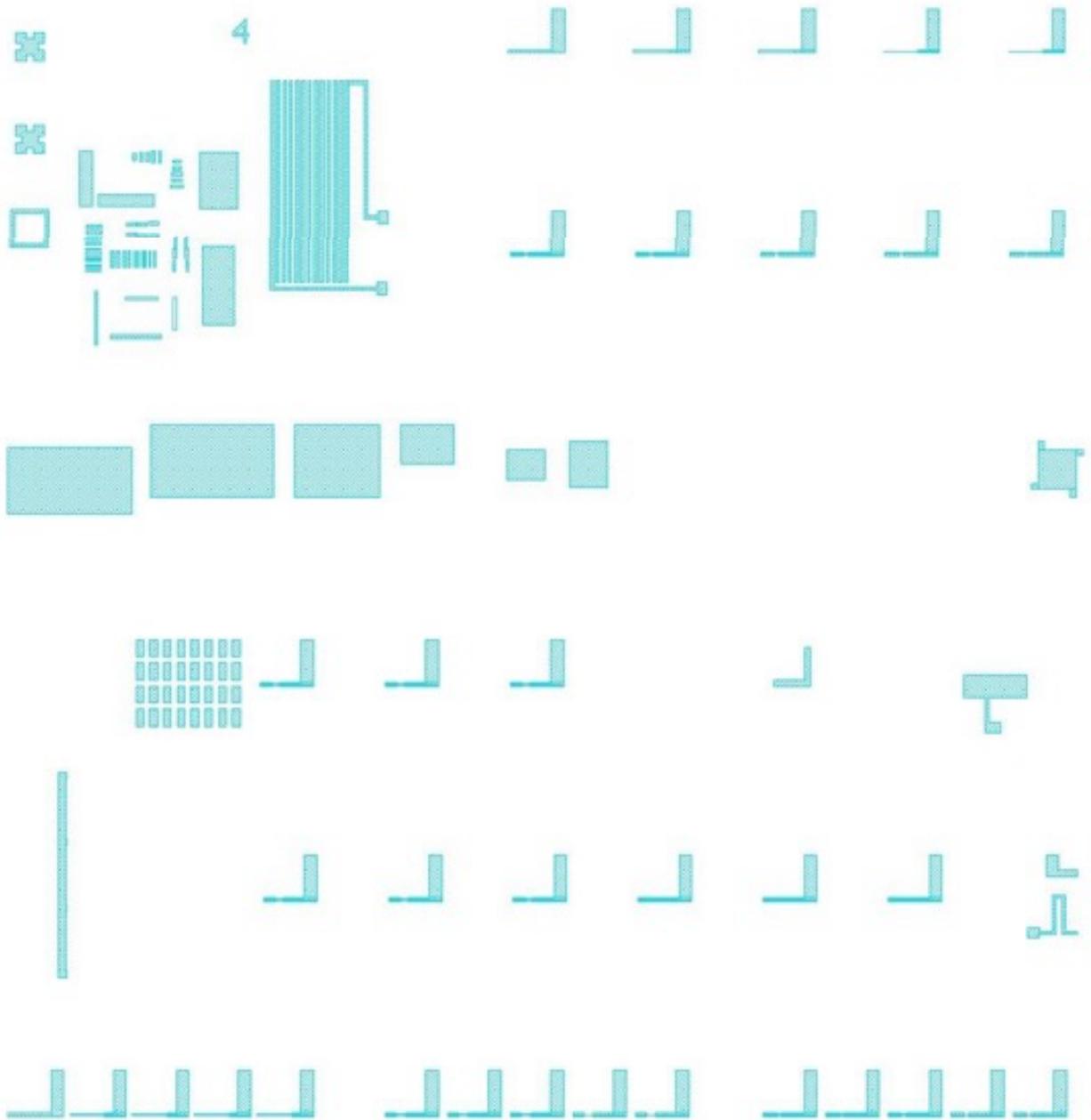
CIRCUIT MOSTEC



Superposition de tous les niveaux – Circuit finalisé

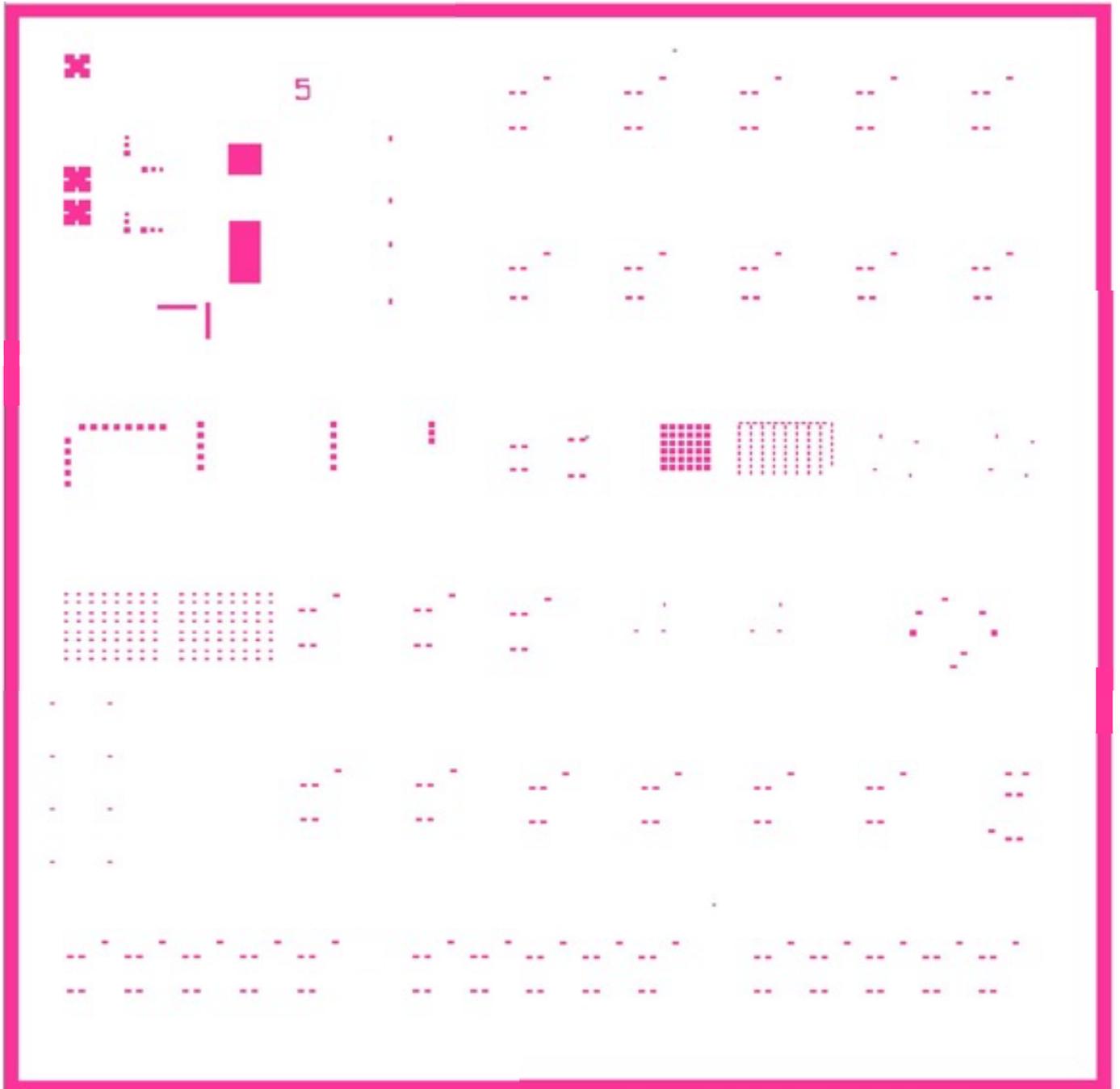
MASQUE DE NIVEAU 4

Gravure du polysilicium



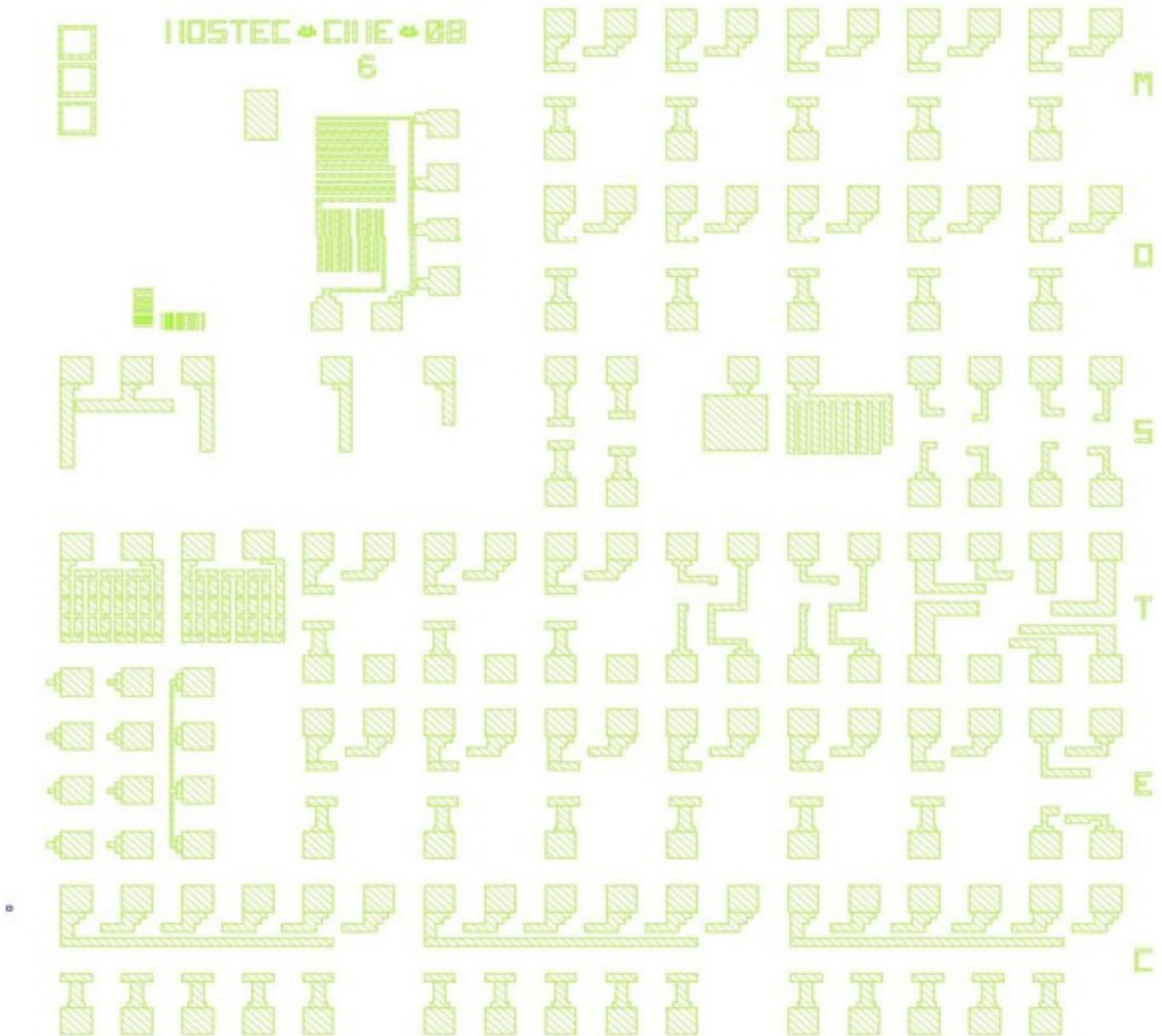
MASQUE DE NIVEAU 5

Définition des contacts – Gravure du LTO



MASQUE DE NIVEAU 6

Définition des interconnexions d'aluminium



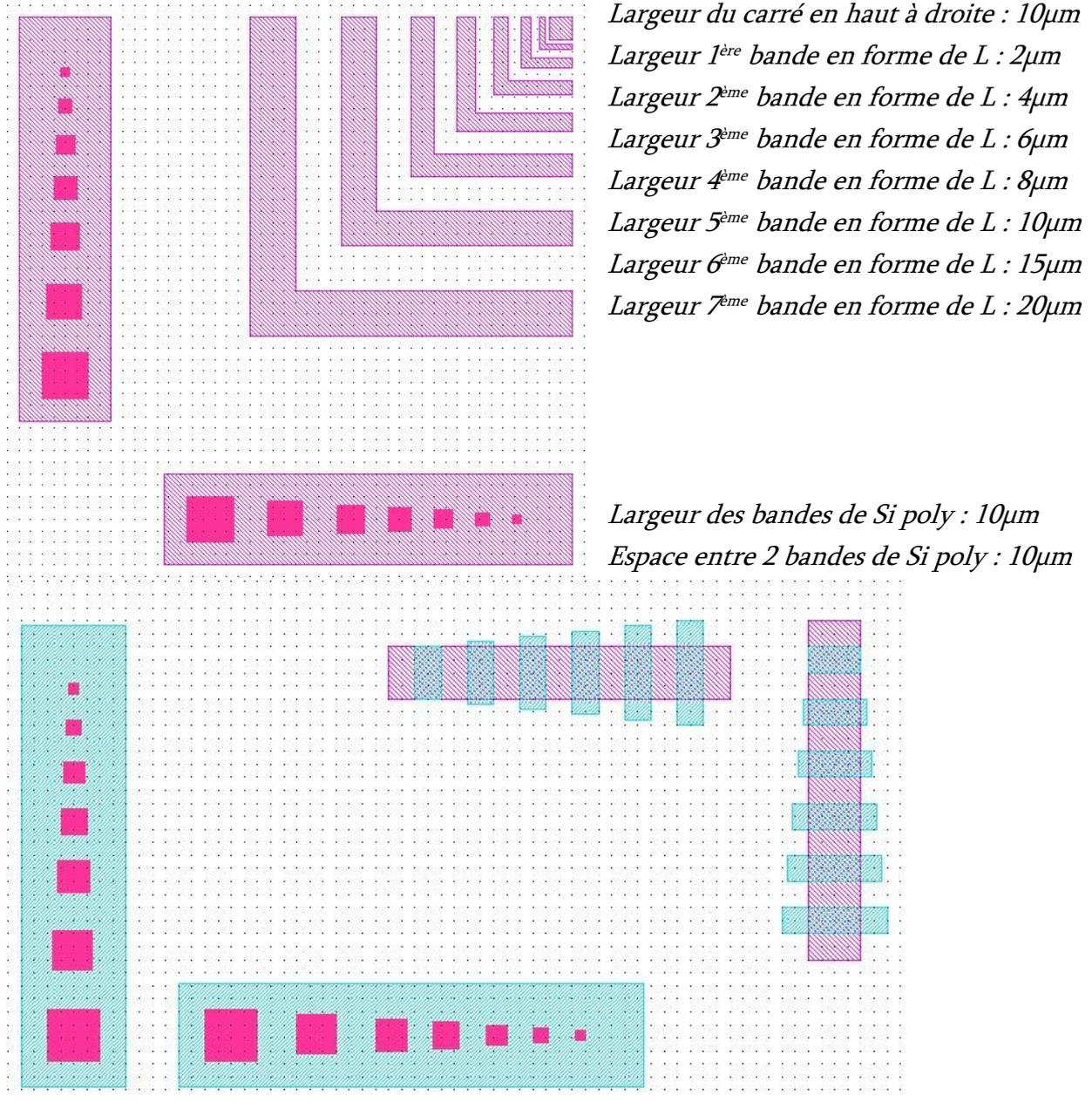
DETAILS DU CIRCUIT MOSTEC – MOTIF DE RESOLUTION

Espacement entre 2 points de maillage : $5\mu\text{m}$

Alignement des motifs

Si poly dans les zones actives

Motifs d'ouvertures des zones actives



Taille des carrés Si poly de bas en haut et de gauche à droite

(du plus grand au plus petit) :

$20 \times 20\mu\text{m}^2$, $15 \times 15\mu\text{m}^2$, $12 \times 12\mu\text{m}^2$, $10 \times 10\mu\text{m}^2$, $8 \times 8\mu\text{m}^2$, $6 \times 6\mu\text{m}^2$, $4 \times 4\mu\text{m}^2$, $2 \times 2\mu\text{m}^2$

Tests de résolution Si poly / passage de marche ouverture zones actives

Largeur de la 1^{ère} paire de bandes de Si poly : 10 μ m ; Espace entre ces 2 bandes : 10 μ m

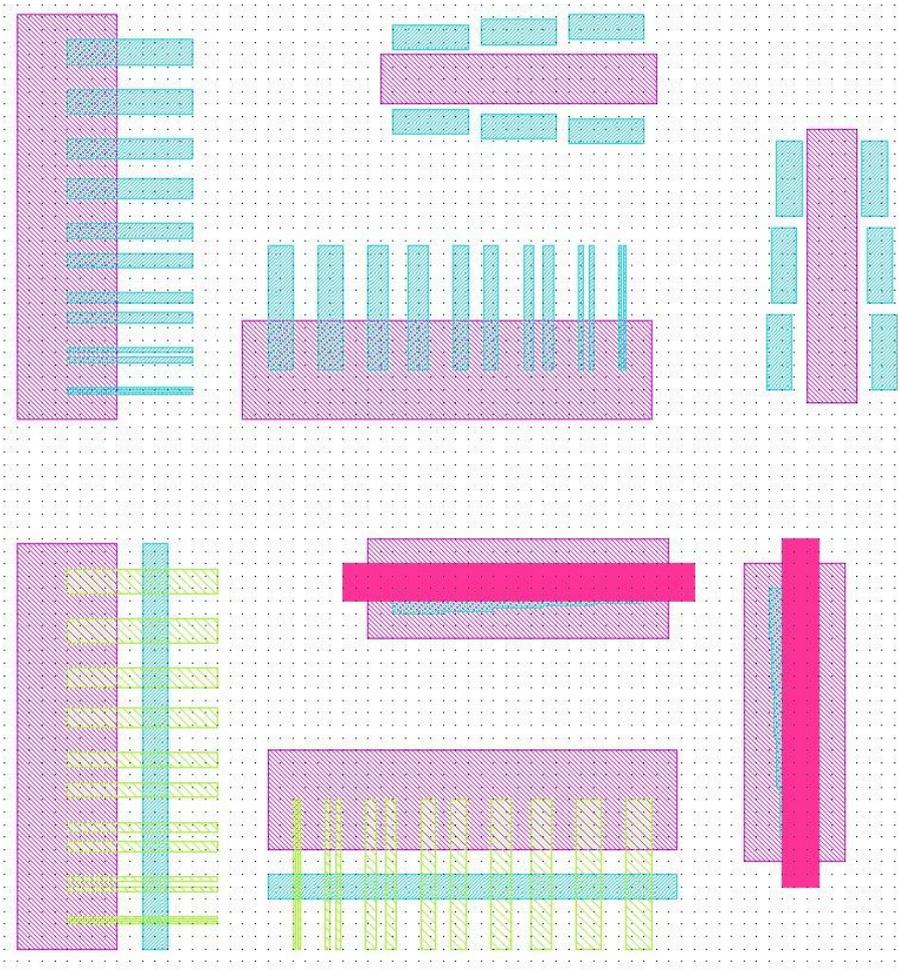
Largeur de la 2^{ème} paire de bandes de Si poly : 8 μ m ; Espace entre ces 2 bandes : 8 μ m

Largeur de la 3^{ème} paire de bandes de Si poly : 6 μ m ; Espace entre ces 2 bandes : 6 μ m

Largeur de la 4^{ème} paire de bandes de Si poly : 4 μ m ; Espace entre ces 2 bandes : 4 μ m

Largeur de la 5^{ème} paire de bandes de Si poly : 2 μ m ; Espace entre ces 2 bandes : 2 μ m

Largeur de la 6^{ème} paire de bandes de Si poly : 1 μ m ; Espace entre ces 2 bandes : 1 μ m



**Alignement Si poly /
ouverture zone active :**
espacements de 2, 4 et 6 μ m

Tests de résolution Aluminium et passage de marches : ouverture zone active et Si poly

Largeur de la 1^{ère} paire de bandes d'Al: 10 μ m ; Espace entre ces 2 bandes : 10 μ m

Largeur de la 2^{ème} paire de bandes d'Al: 8 μ m ; Espace entre ces 2 bandes : 8 μ m

Largeur de la 3^{ème} paire de bandes d'Al: 6 μ m ; Espace entre ces 2 bandes : 6 μ m

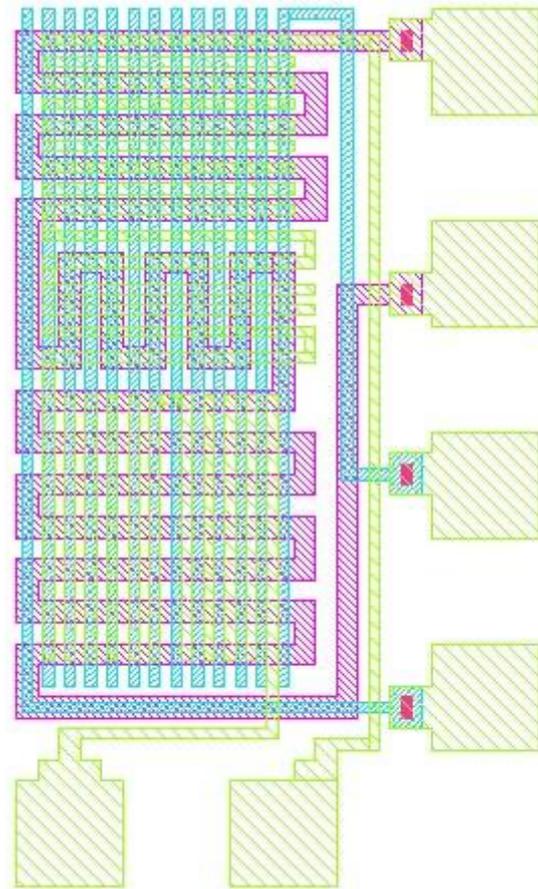
Largeur de la 4^{ème} paire de bandes d'Al: 4 μ m ; Espace entre ces 2 bandes : 4 μ m

Largeur de la 5^{ème} paire de bandes d'Al: 2 μ m ; Espace entre ces 2 bandes : 2 μ m

Largeur de la 6^{ème} paire de bandes d'Al: 1 μ m ; Espace entre ces 2 bandes : 1 μ m

DETAILS DU CIRCUIT MOSTEC

Tests électriques – Passage de marches



Passage de marche

Les bandes de diffusion ont une largeur de 0,02 mm et les bandes de silicium polycristallin et d'aluminium une largeur de 0,01 mm.

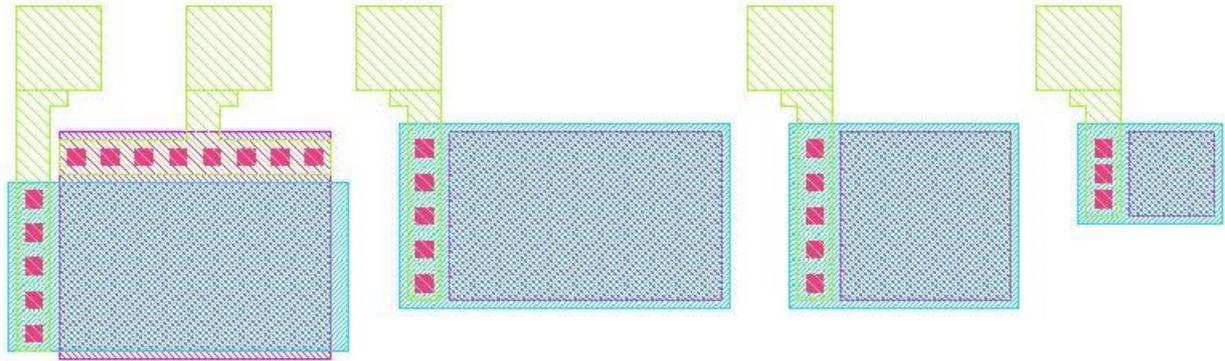
Le motif permettra de détecter d'éventuelles coupures en l'utilisant comme indiqué sur la figure ou d'éventuels court-circuits entre les différents niveaux (il faudra alors disposer les pointes de façon adéquate).

Les bandes de silicium polycristallin passent sur des marches d'oxyde de champ (oxyde de champ / zone active).

Les bandes d'aluminium passent sur des marches d'oxyde de champs (SiPoly / zone active, SiPoly / LTO, oxyde de champ / zone active).

DETAILS DU CIRCUIT MOSTEC

Tests électriques – Capacités – ligne S



De gauche à droite :

*Capacité MOS surface utile $320*200\mu\text{m}^2$ Si poly / oxyde mince / substrat Si*

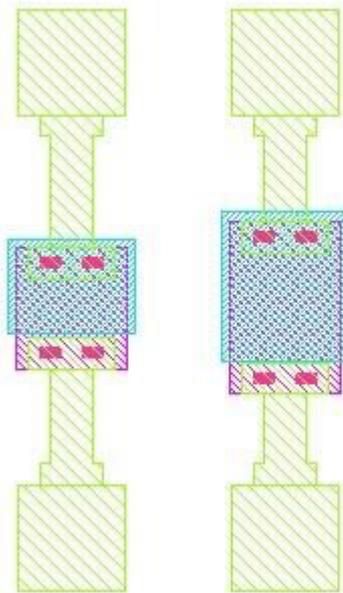
*Capacité MOS surface utile $320*200\mu\text{m}^2$ Si poly / oxyde mince / substrat Si*

*Capacité MOS surface utile $200*200\mu\text{m}^2$ Si poly / oxyde mince / substrat Si*

*Capacité MOS surface utile $100*100\mu\text{m}^2$ Si poly / oxyde mince / substrat Si*

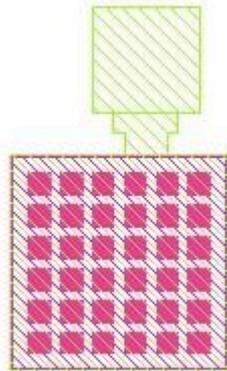
DETAILS DU CIRCUIT MOSTEC

Tests électriques – Diodes – ligne S



*diode PIN 1 : 50*100 μm^2*

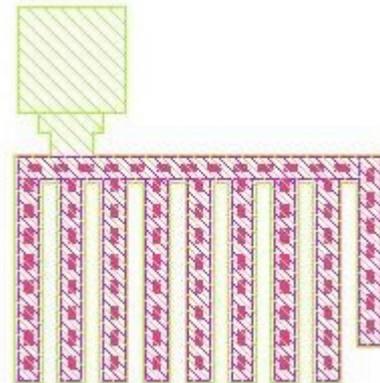
*diode PIN 2 : 100*100 μm^2*



Diode

*de grande surface 200*200 μm^2*

et de petit périmètre : 800 μm



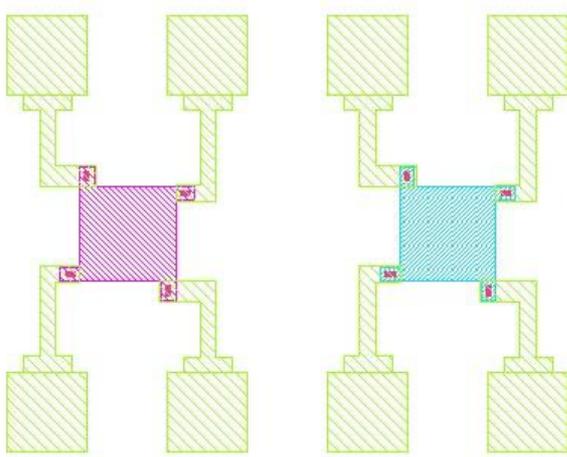
Diode

de grande surface 40320 μm^2

et de grand périmètre 4072 μm

DETAILS DU CIRCUIT MOSTEC

Tests électriques lignes S et T (hors T MOS)

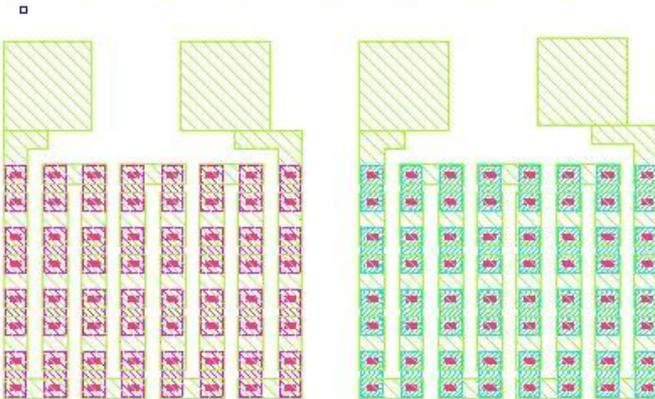


Motif de Van Der Pauw :

À gauche sur silicium dopé N+

À droite sur Silicium poly

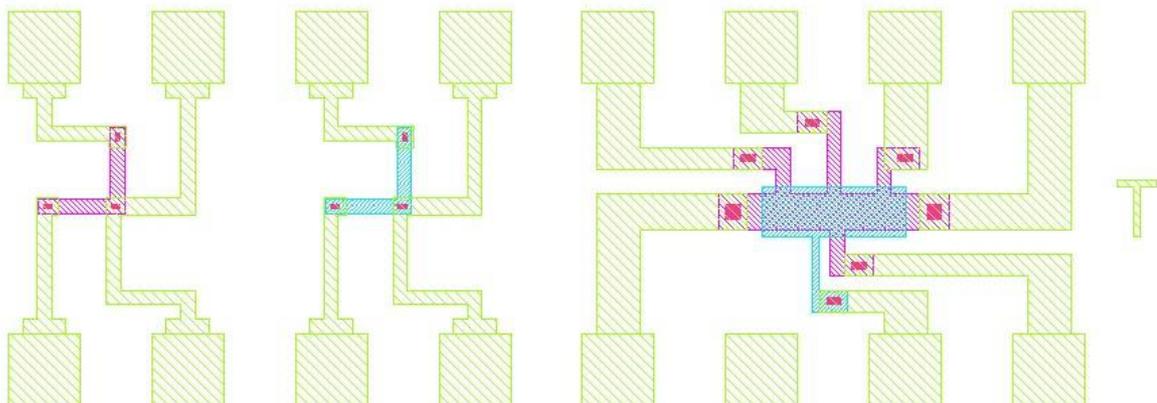
Dimension d'un contact : $6 \times 12 \mu\text{m}^2$



Chaînes de contacts :

À gauche : Al sur Si dopé N+

À droite : Al sur Si poly



*2 motifs de kelvin : permettent la mesure
de la résistance de contact*

Al / Si N+ et Al / Si poly ($12 \times 6 \mu\text{m}^2$)

Motif de Van Der Pauw

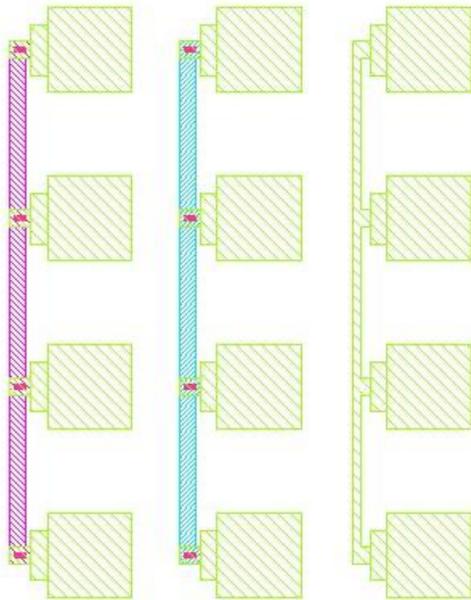
contrôlé par la grille sur substrat naturel

dimension de la grille: $200 \times 10 \mu\text{m}^2$

Largeur des zones dopées: 20 ou $50 \mu\text{m}$

DETAILS DU CIRCUIT MOSTEC

Tests électriques – Divers – ligne E



Résistance de gauche :

Si mono dopé N+

longueur du barreau $600\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$

Résistance du milieu :

Si poly dopé N+

longueur du barreau $600\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$

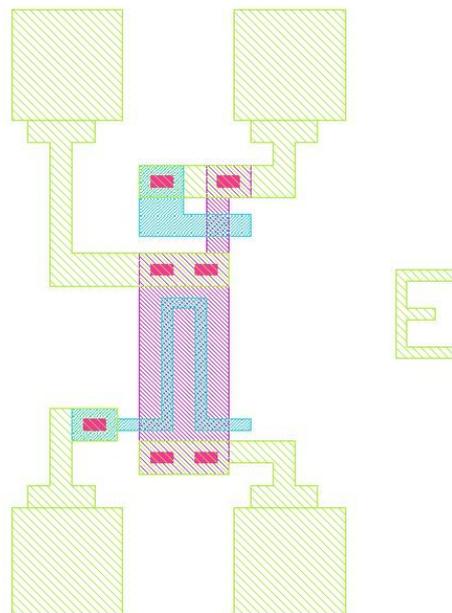
Résistance de gauche : Alu

longueur du barreau $600\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$

Inverseur enrichi / enrichi :

Sortie

VDD



$L_s = 0.01 \text{ mm} ; W_s = 0.3 \text{ mm}$

$L_e = 0.02 \text{ mm} ; W_e = 0.02 \text{ mm}$

Entrée

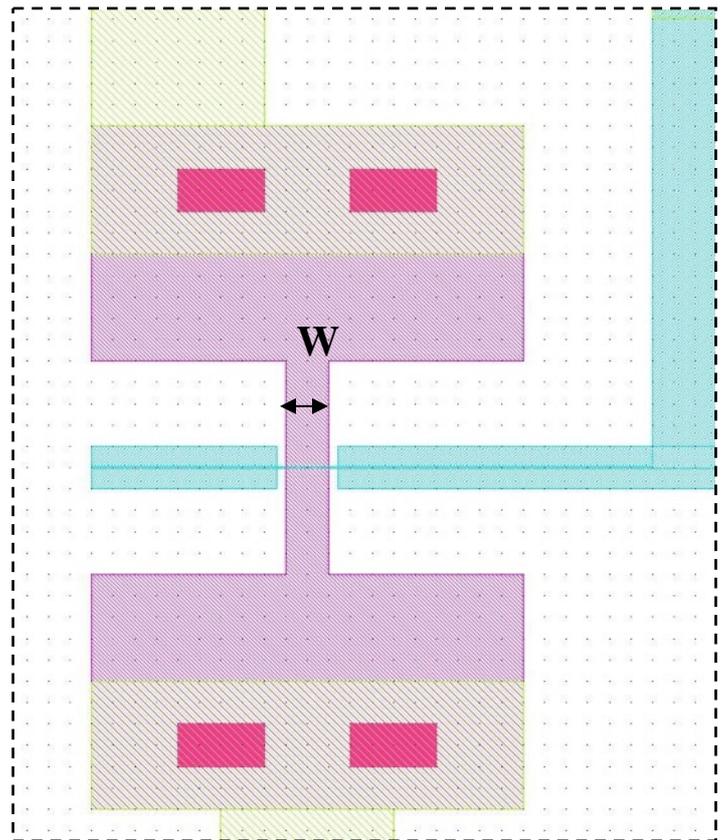
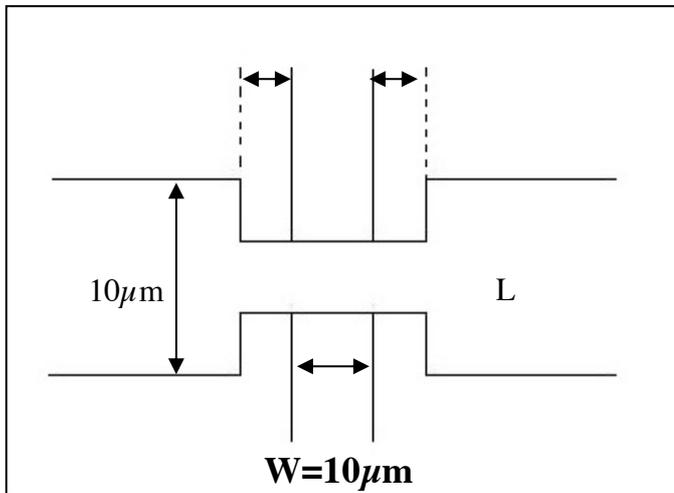
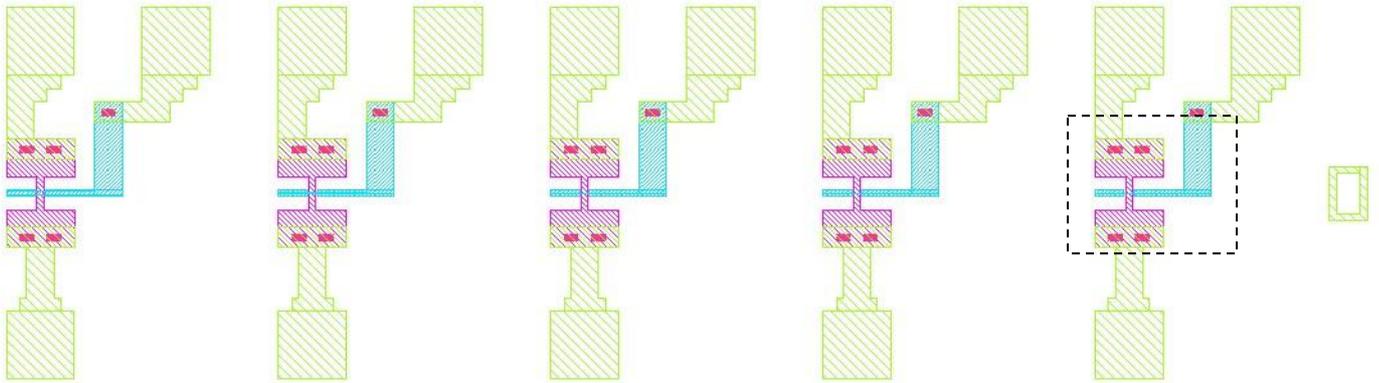
masse

DETAILS DU CIRCUIT MOSTEC

Tests électriques – transistors ligne O

$W = 10 \mu\text{m}$

$L = 6 ; 2 ; 1 ; 0.8 ; 0.5 \mu\text{m}$

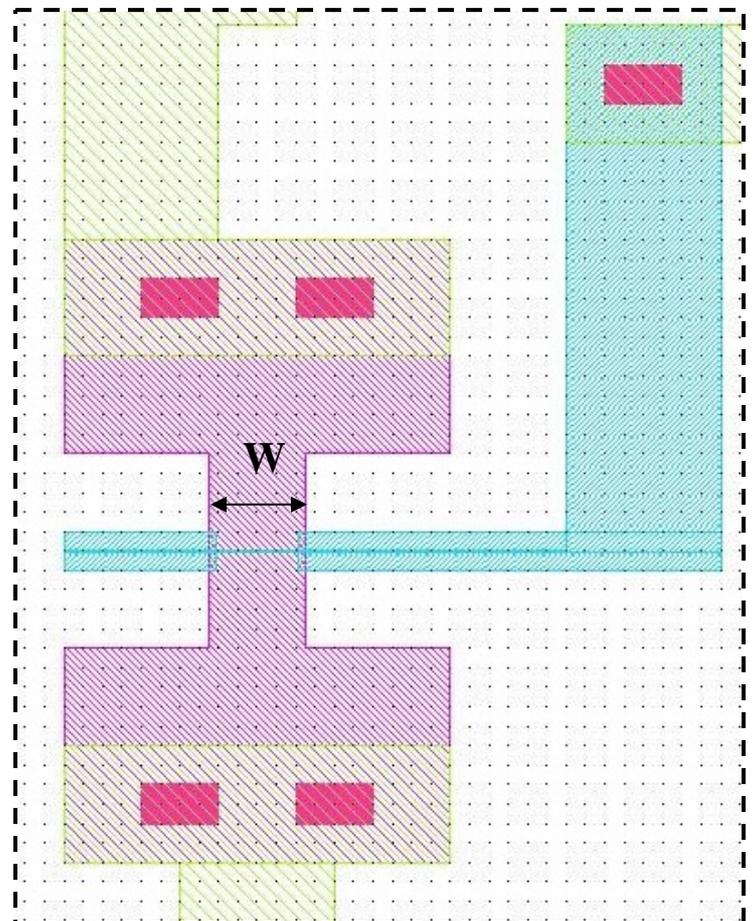
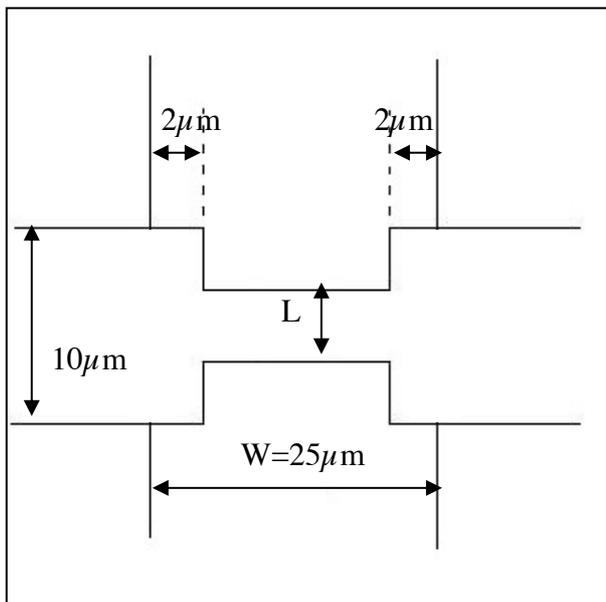
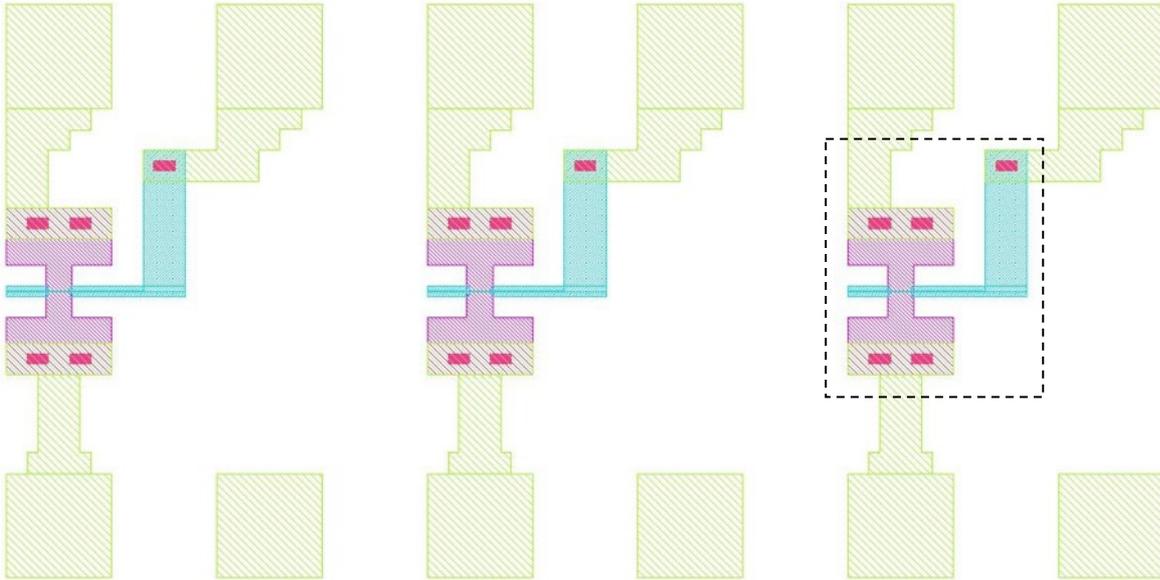


DETAILS DU CIRCUIT MOSTEC

Tests électriques - transistors ligne T

$W=25\ \mu\text{m}$

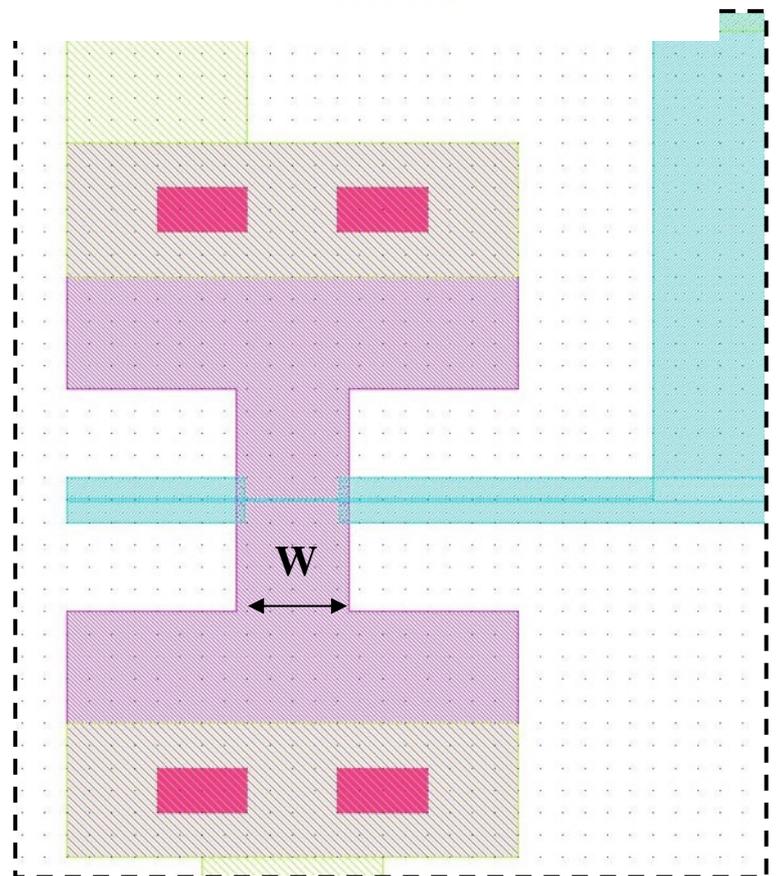
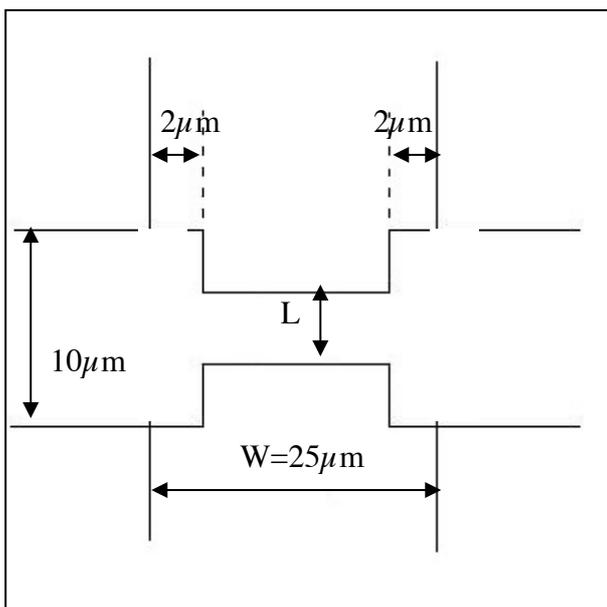
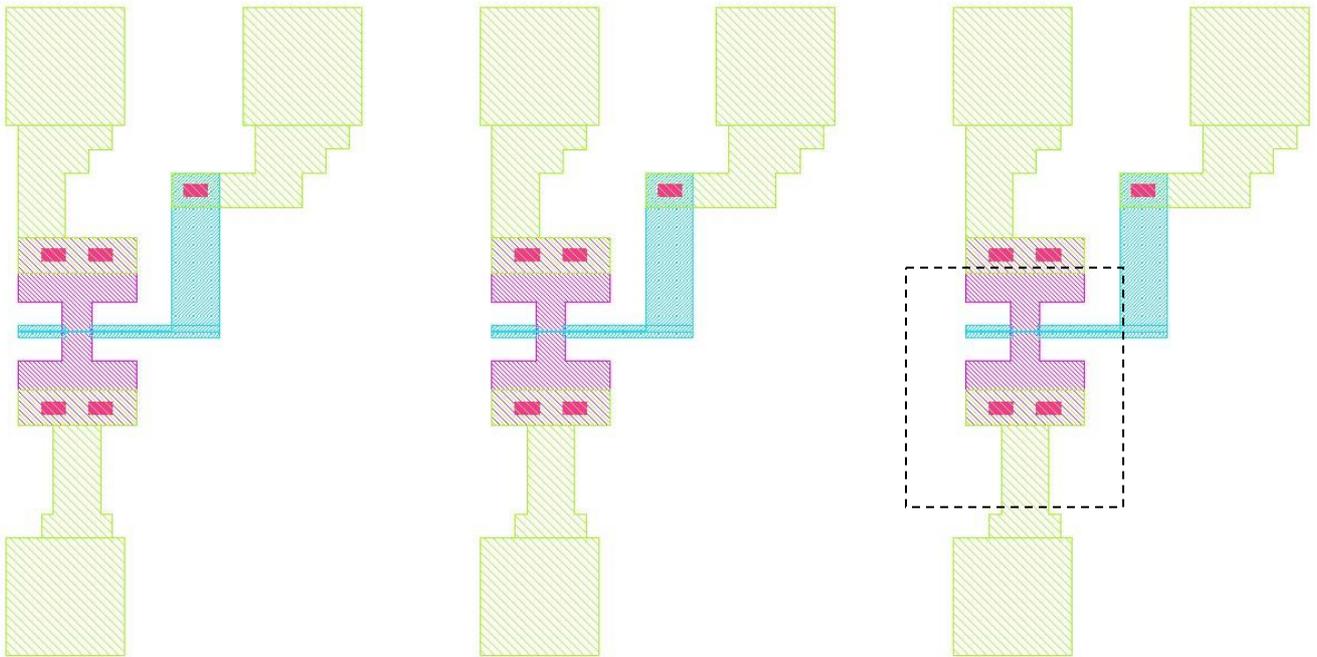
$L=1 ; 0.8 ; 0.5\ \mu\text{m}$



DETAILS DU CIRCUIT MOSTEC

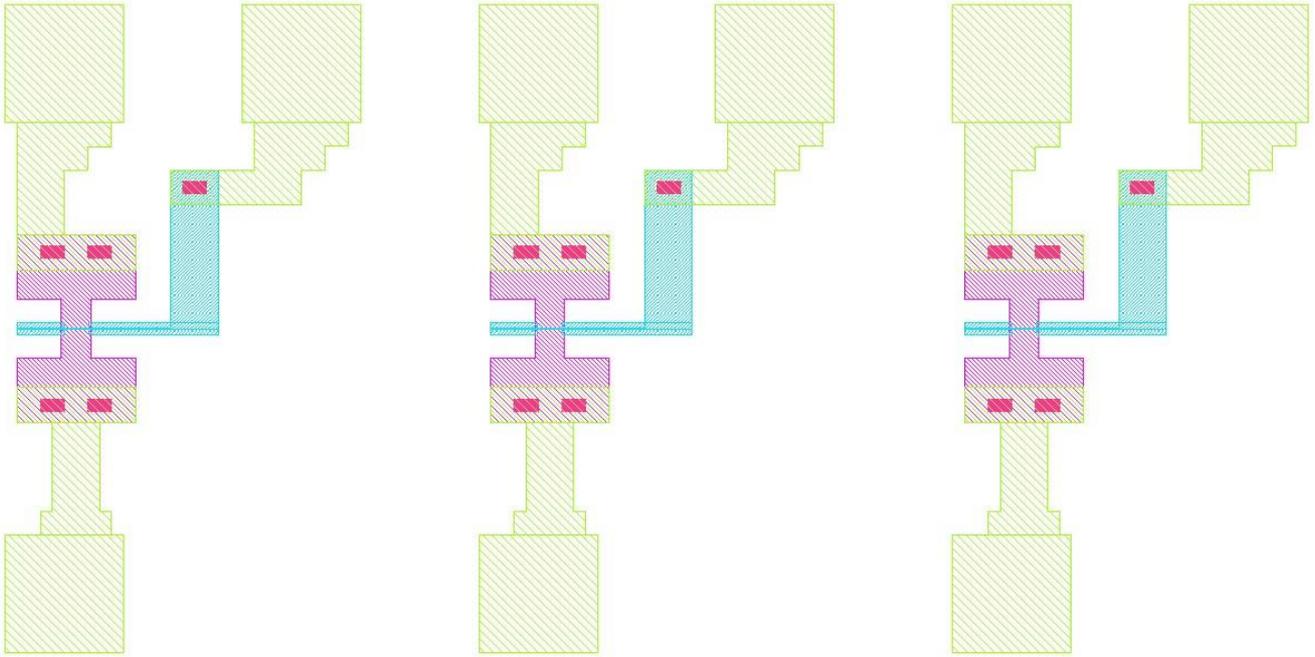
Tests électriques - transistors ligne E

$W=25\ \mu\text{m}$ $L= 1 ; 0.8 ; 0.5\ \mu\text{m}$



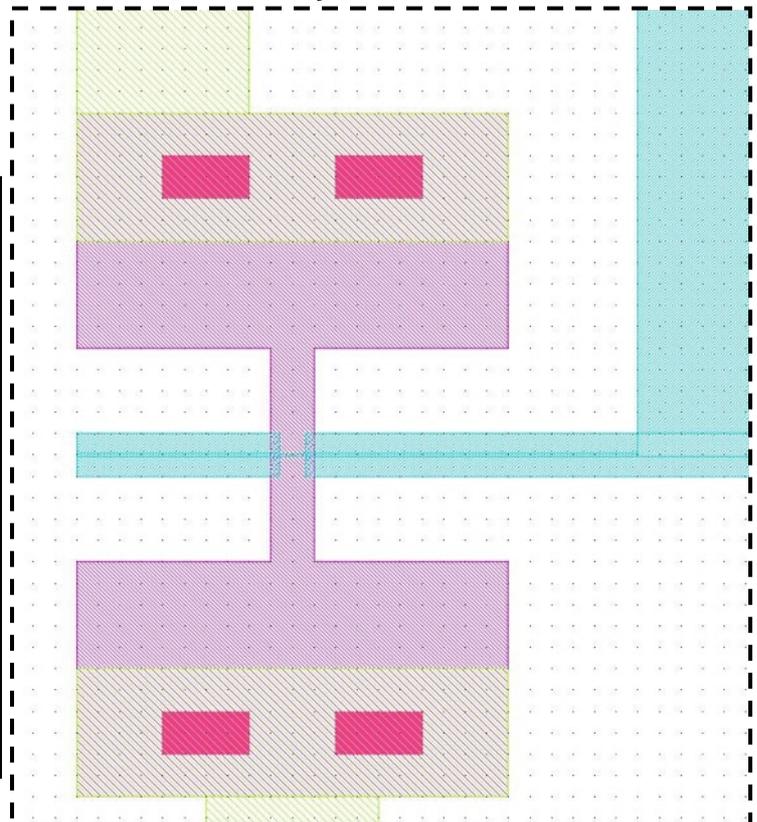
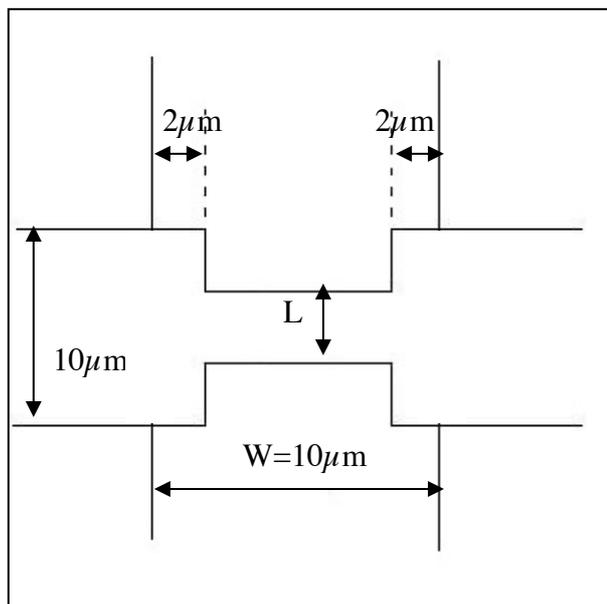
DETAILS DU CIRCUIT MOSTEC

Tests électriques - transistors ligne E



$W=10\ \mu\text{m}$

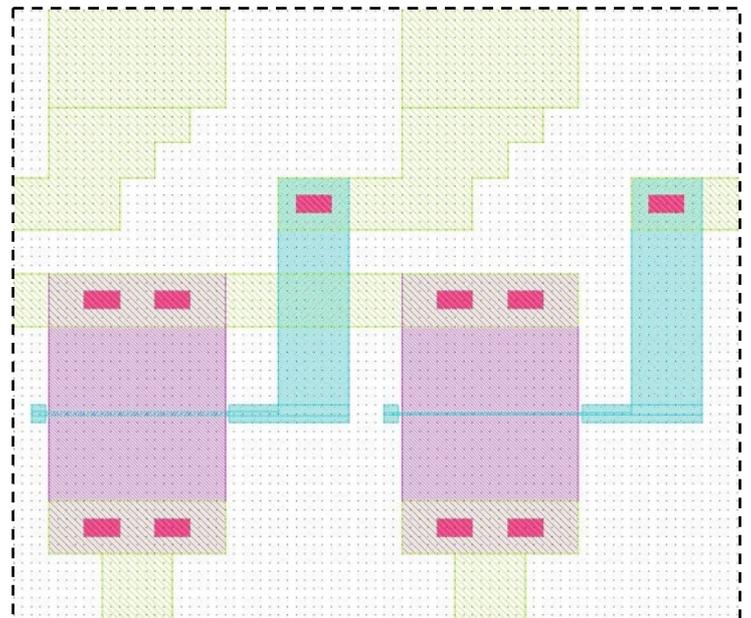
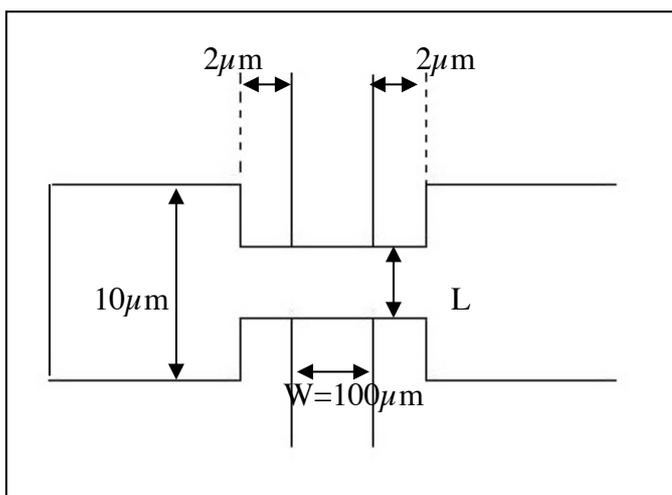
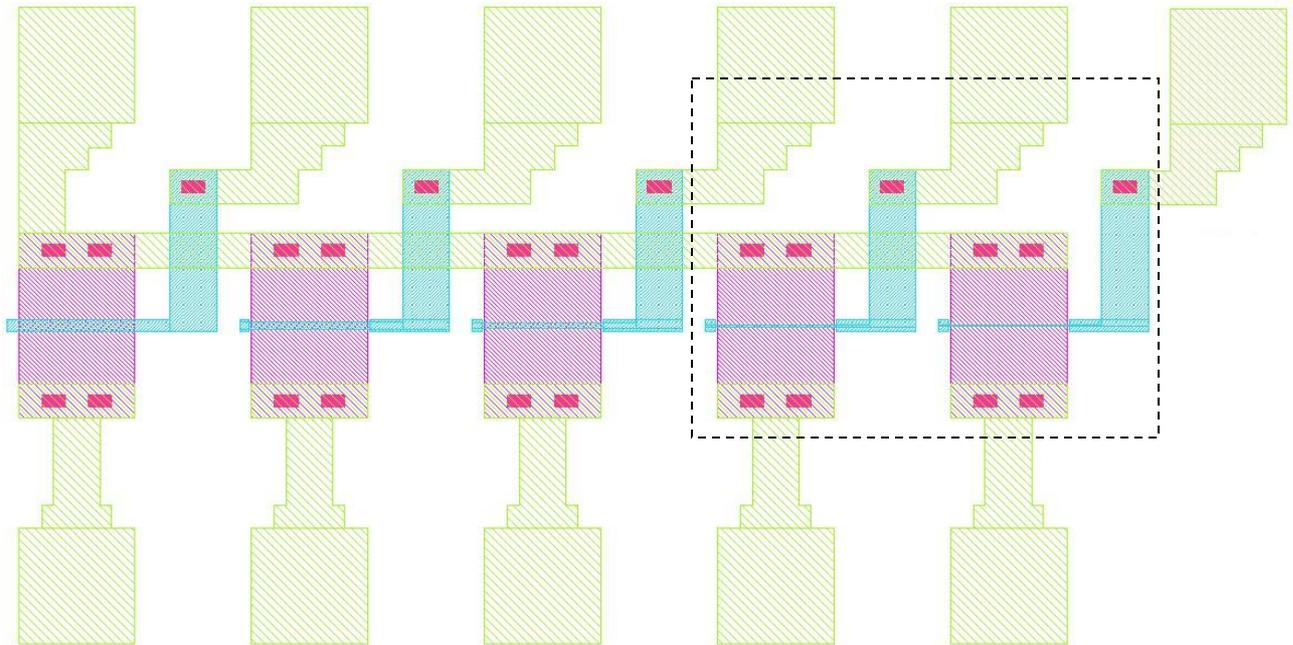
$L=1; 0.8; 0.5\ \mu\text{m}$



DETAILS DU CIRCUIT MOSTEC

Tests électriques - transistors source commune ligne C – gauche

$W=100\ \mu\text{m}$ $L= 10 ; 6 ; 4 ; 2 ; 1\ \mu\text{m}$

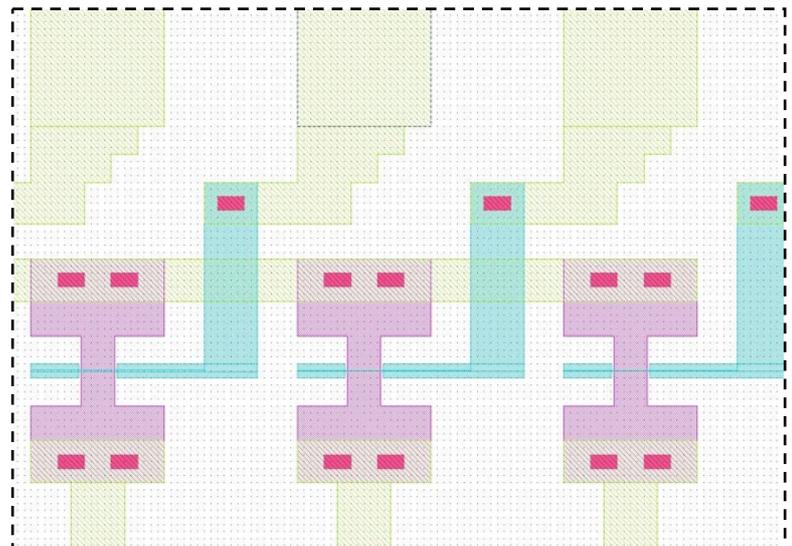
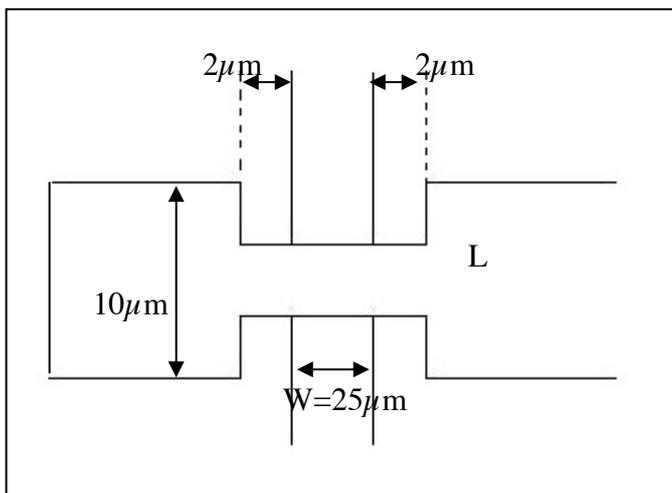
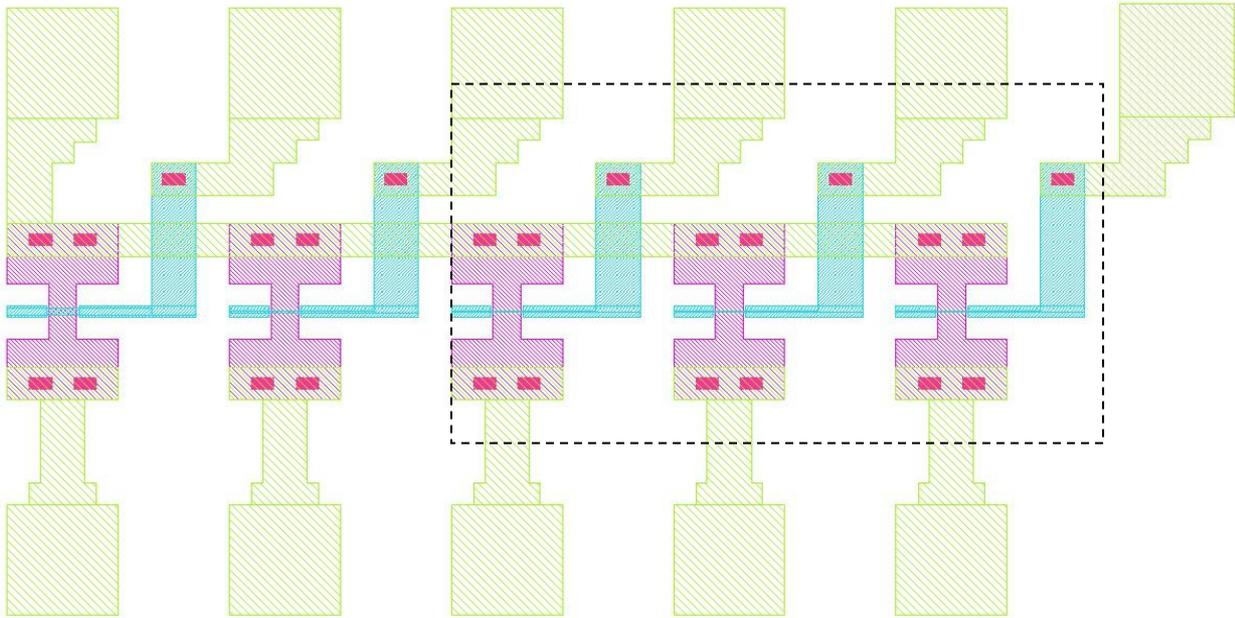


DETAILS DU CIRCUIT MOSTEC

Tests électriques - transistors source commune ligne C – milieu

$W=25\ \mu\text{m}$

$L= 6 ; 2 ; 1 ; 0.8 ; 0.5\ \mu\text{m}$



DETAILS DU CIRCUIT MOSTEC

Tests électriques - transistors source commune ligne C – droite

$W=10\ \mu\text{m}$

$L= 6 ; 2 ; 1 ; 0.8 ; 0.5\ \mu\text{m}$

