

# FABRICATION DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

## Protocole de fabrication



## TP LUMELEC





**ATELIER INTERUNIVERSITAIRE  
DE MICRO-NANO-ÉLECTRONIQUE**  
Pôle CNFM de TOULOUSE



## Sommaire

CONSIGNES D'ÉVACUATION .....	4
CONSIGNES DE SÉCURITÉ.....	5
DIRECTIVES DE MANIPULATION.....	5
PROCÉDURE D'ENTRÉE EN SALLE BLANCHE .....	6
FICHE DE PROCESS.....	7
I- CARACTERISATION DU SUBSTRAT : .....	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
II- OXYDATION DE MASQUAGE : .....	7
1- <i>Nettoyage avant oxydation</i> : .....	7
2- <i>Oxydation thermique humide</i> : .....	8
III- PHOTOGRAVURE N° 1 (OUVERTURE POUR LA DIFFUSION DE LA CATHODE) : .....	9
1- <i>Photolithographie</i> : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
2- <i>Protection face arrière</i> : .....	9
3- <i>Gravure de l'oxyde de masquage</i> .....	9
IV- DIFFUSION DE LA CATHODE : .....	11
V. DÉSOXYDATION DES FENÊTRES DE DIFFUSION : .....	13
VI. MÉTALLISATION FACE AVANT : .....	14
- <i>Pour l'évaporation thermique</i> : .....	14
- <i>Pour la pulvérisation cathodique</i> : .....	14
VII. PHOTOGRAVURE N°2 (GRAVURE MÉTAL) : .....	15
VIII. MÉTALLISATION FACE ARRIÈRE : .....	16
- <i>Pour l'évaporation thermique</i> : .....	15
- <i>Pour la pulvérisation cathodique</i> : .....	15
IX. ASSEMBLAGE : .....	16
1- <i>Découpe</i> .....	16
2- <i>Montage</i> .....	16
3- <i>Micro-soudure</i> .....	16
VUES EN COUPE DES DIFFÉRENTES ÉTAPES DU PROCESS.....	17
FICHE DE CARACTERISATION MATERIAU .....	18
CARACTERISATION ELECTRIQUE DES CELLULES SOLAIRES .....	19
LES MASQUES DE LUMELEC .....	29
1- <i>Les niveaux</i> .....	29
2- <i>Les marques d'alignement</i> .....	30
3- <i>Les zones de test</i> .....	30

## CONSIGNES D'ÉVACUATION

### Consignes destinées aux enseignants

**RAPPEL : chaque enseignant est responsable de l'évacuation dans l'ordre et le calme de tous les étudiants qu'il a en charge au moment de l'alerte.**

▶ **EN SALLES BLANCHES N°1 ET N°3 :**

Évacuer l'ensemble des personnes présentes par les issues de secours qui donnent directement dans le hall d'entrée.

Ne pas repasser par le SAS, ne pas se déshabiller.

▶ **EN SALLES BLANCHES N°2 ET N°4 :**

Évacuer les étudiants par l'issue de secours qui donne en galerie d'observation puis sur la pelouse arrière.

**Rassembler tous les étudiants devant l'entrée de l'A.I.M.E.**

**Effectuer un recensement.**

**Ne pas réintégrer les locaux sans l'avis des pompiers ou du directeur (ou du responsable technique présent).**

## CONSIGNES DE SÉCURITÉ

### REPEREZ LES EQUIPEMENTS DE SECURITE :

- issues de secours
- douches de sécurité
- extincteurs
- équipements respiratoires autonomes

### LE PORT DES LUNETTES DE PROTECTION EST OBLIGATOIRE POUR :

- nettoyages chimiques (R.C.A.<sup>1</sup> et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)
- toute attaque humide

IL EST **INTERDIT** AUX STAGIAIRES DE TRANSPORTER LES PRODUITS CHIMIQUES D'UN POSTE DE TRAVAIL À UN AUTRE.

### GARDEZ PRÉSENT À L'ESPRIT QUE :

- le port des gants est obligatoire mais ils ne constituent pas une protection suffisante contre les hautes températures ou les produits corrosifs
- certains bains dégagent des vapeurs nocives, normalement aspirées par les hottes à flux laminaire
- les couvre-chaussures rendent parfois le sol très glissant.

## DIRECTIVES DE MANIPULATION

**Attention** : les boîtes de plaquettes s'ouvrent en tournant le couvercle dans le **sens** des aiguilles d'une montre.

Pour prendre une plaquette avec la pince :

- profiter du méplat dans le cas où la plaquette est dans la boîte
- pincer à au moins 5 mm du bord de la plaquette pour réduire le risque de rupture
- si la plaquette est sur une surface plane, la faire glisser jusqu'au bord pour la saisir plus facilement.

Toute plaquette sortant d'un traitement humide doit subir à la fin un rinçage à l'eau D.I. et un séchage mécanique avant d'être rangée dans sa boîte.

Un bon rinçage doit inclure un changement de pince, il faut avoir une seconde pince disponible et propre.

Les becs des pinces ne doivent pas être essuyés (ni sur la blouse, ni sur du papier), ils doivent être rincés à l'eau D.I. et séchés à l'azote.

La fonction des gants est de protéger les composants contre la contamination. Il faut aussi éviter de contaminer les gants.

Le plastique des boîtes ne supporte pas la température des plaquettes sortant juste d'un four : laisser celles-ci refroidir environ 20 secondes à l'air libre.

Le papier est une source de contamination, faites-en l'usage minimum.

<sup>1</sup> RCA : Radio Corporation of America

## PROCÉDURE D'ENTRÉE EN SALLE BLANCHE

Laisser les vêtements de ville et les sacs dans les casiers de l'espace étudiant, verrouillables par monnayeur.

### ► ENTRÉE EN SALLE BLANCHE

Blouse :  
- blanche : personnel permanent  
- bleue : stagiaire  
- verte : visiteur

Couvre-chaussures :  
- mis à disposition dans le meuble bas à couvercles métalliques  
- à chausser en plaçant la couture à l'intérieur  
- ne poser le pied dans la partie propre du sas qu'une fois chaussé.

Charlottes : mises à disposition dans le distributeur mural.

Gants latex : 2 tailles mises à disposition dans 2 distributeurs muraux.  
(en cas d'allergie au latex, des gants nitrile peuvent être fournis).

### ► SORTIE DE LA SALLE BLANCHE

Blouse : à suspendre au cintre numéroté correspondant à chaque binôme

Couvre-chaussures : à jeter à la poubelle

Charlottes : à garder dans la manche de la blouse

Gants latex : à jeter à la poubelle

### ► RECOMMANDATIONS

Veiller à ne pas entrer dans le sas avec des chaussures de ville boueuses ou mouillées (utiliser le paillason à l'entrée de l'AIME).

Limiter le nombre d'objets et de documents qui entrent en salle blanche (crayon à mine carbone proscrit).

## FICHE DE PROCESS

### Remarque préliminaire :

Pendant toute la durée du process, le contrôle de la qualité de chaque étape doit être un souci permanent si l'on veut aboutir à un composant final en état de marche, ainsi qu'à un bon rendement sur l'ensemble de la plaquette. Dans ce but, on utilisera, en parallèle avec la plaquette « composants », une plaquette « témoin » qui permettra de caractériser avec précision chaque étape réalisée avant de passer à la suivante.

## I- CHARACTERISATION DU SUBSTRAT

Le substrat utilisé est du silicium de type P (dopé Bore), d'orientation <100>, dont vous devrez dans un premier temps déterminer les caractéristiques indiquées ci-dessous et les reporter sur la fiche de caractérisation (p.19)

Ces mesures se font sur les plaquettes n'ayant subi aucun traitement.

Opérations	Valeurs des paramètres
<input type="checkbox"/> 1°) Mesure épaisseur wafer	e = <span style="float: right;">µm</span>
<input type="checkbox"/> 2°) Mesure « 4 pointes »	V/I = <span style="float: right;">Ω</span>
<input type="checkbox"/> 3°) Calcul résistance/carré	R <sub>□</sub> = <span style="float: right;">Ω/□</span>
<input type="checkbox"/> 4°) Calcul résistivité	ρ <sub>s</sub> = <span style="float: right;">Ω.cm</span>
<input type="checkbox"/> 5°) Concentration dopant	N <sub>A</sub> = <span style="float: right;">at.cm<sup>-3</sup></span>

## II- OXYDATION DE MASQUAGE :

Cette étape est généralement réalisée par le personnel de l'AIME. Elle consiste à nettoyer la surface de la plaquette pour réaliser une oxydation thermique permettant de former un oxyde SiO<sub>2</sub> épais. Cet oxyde dit « **oxyde de masquage** » protège l'ensemble de la plaquette. Par photogravure on ouvre les différentes « fenêtres » nécessaires aux étapes ultérieures du process (oxydation mince, ouvertures de contact,...).

### 1- Nettoyage avant oxydation :

Opérations	Conditions
<input type="checkbox"/> 1°) Dégraissage	Acétone, eau DI
<input type="checkbox"/> 2°) Oxydation chimique	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (1 / 1) – 2 min
<input type="checkbox"/> 3°) Rinçage	Eau DI
<input type="checkbox"/> 4°) Attaque SiO <sub>2</sub>	HF dilué - 30 s
<input type="checkbox"/> 5°) Rinçage	Eau DI
<input type="checkbox"/> 6°) Séchage	Tournette de séchage
<input type="checkbox"/> 7°) Lavage - séchage	Laveur-sécheur – 4 min

## 2- Oxydation thermique humide :

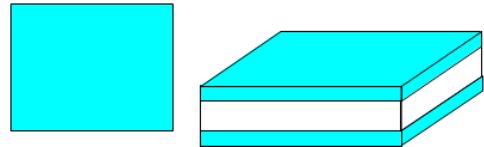
Cette opération s'effectue en cinq étapes dans le four N° 2-2

	Température	Temps	Débit
<input type="checkbox"/>	de 600 à 1100 °C	20 min	N <sub>2</sub> = 1 l/min
<input type="checkbox"/>	1100 °C	35 min	H <sub>2</sub> = 2,7 l/min - O <sub>2</sub> = 1,5 l/min
<input type="checkbox"/>	1100 °C	30 min	O <sub>2</sub> = 2,2 l/min
<input type="checkbox"/>	1100 °C	10 min	Ar = 1,5 l/min
<input type="checkbox"/>	de 1100 à 600 °C	60 min	N <sub>2</sub> = 1 l/min

A la fin de cette étape d'oxydation, vous récupèrerez deux plaquettes :

- une plaquette dite « **composant** » où seront réalisées les cellules photovoltaïques
- une plaquette dite « **témoin** » servant à caractériser les principales étapes du process.

masking oxide
Si (P)
masking oxide





### III- PHOTOGRAVURE n° 1 (OUVERTURE POUR LA DIFFUSION DE LA CATHODE):

Cette étape est destinée à graver l'oxyde de masquage précédemment formé sur la face avant de la **plaquette composant**. Elle se déroule en deux phases successives : une première opération dite de **photolithographie** au cours de laquelle une résine est déposée puis développée après insolation à travers le masque n°1. A ceci s'ajoute une étape intermédiaire de **protection de la face arrière** et enfin une étape dite de **gravure humide** (wet-etching en anglais) du SiO<sub>2</sub>. Les opérations nécessaires à ces différentes étapes sont décrites ci-dessous :

	Visa de l'encadrant pour la poursuite des opérations	▼
Opérations	Conditions	
<input type="checkbox"/> 1°) Séchage	Plaque chauffante 120 °C – 2 min	
<input type="checkbox"/> 2°) Dépôt promoteur d'adhérence	HMDS, tournette (4000 tr/min - 30s)	
<input type="checkbox"/> 3°) Dépôt résine (cf. fig *)	Microposit S1813 (4000 tr/min - 30s)	
<input type="checkbox"/> 4°) 1ère cuisson	Plaque chauffante 100 °C – 1 min	
<input type="checkbox"/> 5°) Alignement - Insolation	Masque n°1 – 4 s	
<input type="checkbox"/> 6°) Développement (cf. fig **)	Bain à 20 °C – 30 s	
<input type="checkbox"/> 7°) Rinçage	Eau DI	
<input type="checkbox"/> 8°) Séchage	Tournette de séchage	
<input type="checkbox"/> 9°) Observation	Microscope optique	
<input type="checkbox"/> 10°) 2ème cuisson	Plaque chauffante 120 °C – 45 s	

### 2- Protection face arrière:

A cette étape du process, la protection de la face arrière est nécessaire afin de préserver la couche d'oxyde épaisse qui évitera la formation de jonctions parasites sur la face arrière lors de l'étape de diffusion. Cette protection est assurée par un film adhésif, résistant aux attaques acides et aux solvants, et retiré après exposition aux UV.

	Visa de l'encadrant pour la poursuite des opérations	▼
Opérations	Conditions	
<input type="checkbox"/> 11°) Protection face AR	Film « UV »	

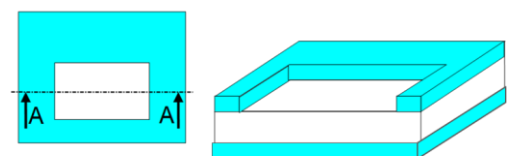
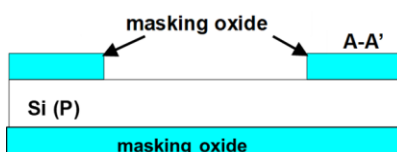
### 3- Gravure de l'oxyde de masquage :

Le but de cette étape est de **graver, à travers le masque de résine, l'oxyde de masquage et de délimiter ainsi des régions de la plaquette où apparaît le silicium à nu**. Ces régions sont appelées « fenêtrées de diffusion » car c'est à travers elles qu'aura lieu la diffusion du dopant, l'oxyde de masquage faisant ailleurs office de barrière à la diffusion. Cette gravure est une gravure dite humide qui s'effectue par immersion de la plaquette dans une solution acide appropriée. Cette solution gravera sélectivement l'oxyde vis à vis du silicium. Il est important de connaître le temps d'attaque du bain employé car celui-ci peut varier d'un bain à un autre ou encore selon la température et l'âge de la solution. La détermination de cette vitesse, et donc du temps d'attaque à employer, s'effectuera sur la plaquette témoin à l'aide des opérations suivantes :

**# Procéder au traitement témoin n°1 afin de déterminer t1 (Voir page 16).**

**Attention :** il faudra veiller à utiliser lors de l'attaque de la plaquette composant le **même** buffer que celui qui a permis d'évaluer le temps d'attaque sur la plaquette témoin.

<b>Visa de l'encadrant pour la poursuite des opérations</b>			▼
<b>Opérations</b>	<b>Conditions</b>		
⇒ 1°) Attaque SiO <sub>2</sub>	Tampon HF (sur plaquette composant pendant temps t1 déterminé selon témoin)		
⇒ 2°) Rincage	Eau DI		
⇒ 3°) Séchage	Sécheuse		
⇒ 4°) Contrôle	Microscope optique		
⇒ 5°) Retrait du film UV	Retirez le film UV au dos (en plaçant la plaquette pendant 4 minutes sous la lampe UV ou en nettoyant à l'acétone)		
⇒ 5°) Retrait de la résine	Acétone		
⇒ 6°) Nettoyage	Eau DI		
⇒ 7°) Séchage	Sécheuse		



#### Nota :

- 1 - Toute solution aqueuse glisse sur le Si tandis qu'elle mouille sur le SiO<sub>2</sub>. L'attaque sera donc terminée lorsqu'on constatera visuellement que le HF ne tient plus sur la plaquette.
- 2 – Comment appliquer le film UV :

- Découper une portion de film légèrement plus grande que la surface à couvrir
- Enlever la pellicule protégeant la face collante et appliquer le film sur la surface en veillant surtout à ce qu'il adhère parfaitement aux bords de la surface à couvrir
- Après l'étape de gravure humide, placez le morceau de wafer pendant environ 4mn sous la lampe UV afin de dégrader la colle, et soulevez ensuite le film qui ne doit pratiquement plus opposer de résistance.

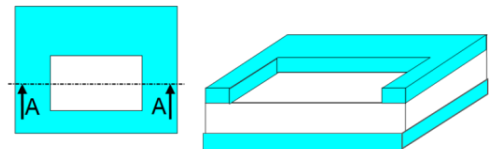
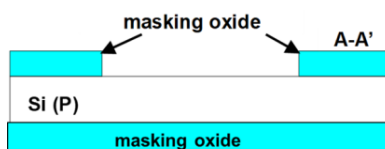
## DECONTAMINATION ORGANIQUE

**La plaquette témoin issue de l'étape 3) subira également cette étape de décontamination.**

Opérations	Conditions
<input type="checkbox"/> 1°) Nettoyage	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (1 :1) - 2 min
<input type="checkbox"/> 2°) Rinçage	Eau DI
<input type="checkbox"/> 3°) Séchage	Sécheuse

L'épaisseur de l'oxyde de masquage initial ( $e_m$ ) sera mesurée sur la plaquette témoin à l'aide du **profilomètre** (TENCOR) et de l'**ellipsomètre**, et sera reportée sur la fiche de caractérisation (p.19).

A ce stade du process, le profil en coupe de la plaquette « composant » est le suivant :



### Nota :

A cette étape, les parties d'oxyde de masquage restantes sur les bords de la fenêtre retiennent le liquide HF par un simple effet géométrique. **La transition hydrophile/hydrophobe est donc difficile à observer.** Nous vous conseillons donc de vérifier la gravure en immergeant la zone de test située près du méplat et ainsi observer le caractère hydrophobe de la surface.

## IV- DIFFUSION DE LA CATHODE :

Nous allons maintenant aborder la fabrication de la jonction PN de la cellule photovoltaïque.

**Rappel :** dans notre procédé, la plaquette (ou le substrat de silicium) est de type P (les trous sont les porteurs majoritaires) et constitue l'anode de la diode. La cathode sera donc de type N (les électrons sont les porteurs majoritaires) et sera obtenue par diffusion d'un dopant de type donneur, comme le phosphore dans notre cas.

### Nota :

**La grosse partie de la plaquette témoin issue de l'étape 3) subira elle aussi cette diffusion.**

En résumé, cette étape permet de diffuser une zone dopée N dans le silicium de départ dopé P.

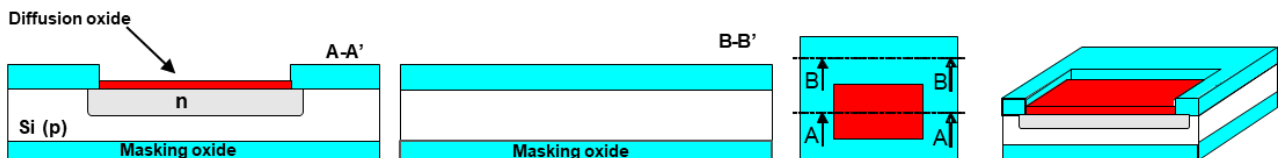
La diffusion s'effectue dans le four n°1-1. Elle consiste à placer, à haute température, les tranches de silicium dans un tube balayé par :

- un gaz neutre  $N_2$ ,
- de l'oxygène,
- un composé gazeux contenant l'élément dopant, ici du  $POCl_3$ .

On réalise donc la diffusion des impuretés de type N (phosphore) au voisinage de la surface du silicium :

	Température	Temps	Débit
<input type="checkbox"/>	950°C	5 min	$N_2 = 2 \text{ l/min} - O_2 = 0,1 \text{ l/min}$
<input type="checkbox"/>	950 °C	17 min	$N_2 = 2 \text{ l/min} - O_2 = 0,1 \text{ l/min}$ $POCl_3 = 5 \text{ mg/min}$
<input type="checkbox"/>	950 °C	7 min	$N_2 = 2 \text{ l/min} - O_2 = 0,1 \text{ l/min}$

A haute température, l'oxygène réagit avec la surface du silicium pour former un oxyde dopé (« verre ») qui sert de source à la diffusion.



## V. DÉSOXYDATION DES FENÊTRES DE DIFFUSION :

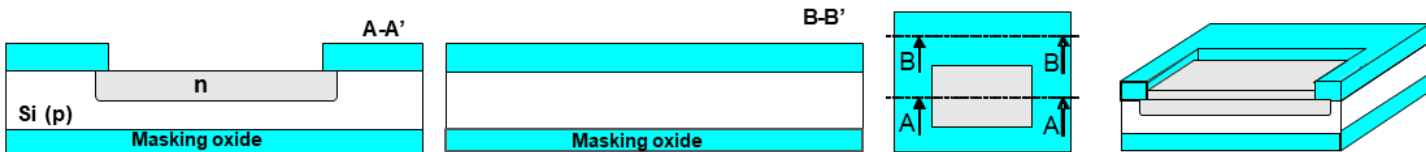
Afin de prendre les contacts de cathode en face avant, on attaquera l'oxyde de pré-dépôt de manière à revenir au niveau de la surface de silicium dans les fenêtres de diffusion. Il faudra donc auparavant mesurer le temps d'attaque  $t_2$  nécessaire à cette gravure sur la partie gauche de la plaquette témoin. On effectuera en réalité une légère sur-gravure pour être sûr d'éliminer tout l'oxyde et d'obtenir ainsi des contacts de bonne qualité.

**\* ETAPE DE CARACTERISATION DU MATERIAU** (valeurs à reporter dans la FICHE DE CARACTERISATION MATERIAU – p.19 ) :

- les épaisseurs d'oxydes  $e'_m$  et  $e_r$  seront mesurées sur cette plaquette témoin à l'aide du **profilomètre (TENCOR) et de l'ellipsomètre**,
- la concentration en phosphore de la zone diffusée sera déduite de la profondeur de jonction  $x_j$  et du rapport  $V/I$  obtenus à partir de mesures effectuées sur la partie gauche du témoin,
- la concentration en bore du substrat de départ sera déduite des mesures effectuées soit sur la bande désoxydée de la plaquette témoin de l'étape 3), soit sur la partie droite de cette plaquette témoin.

**# Procéder au traitement témoin n°2 afin de déterminer  $t_2$  (Voir page 17).**

	<b>Visa de l'encadrant pour la poursuite des opérations</b>	▼
<b>Opérations</b>	<b>Conditions</b>	
<input type="checkbox"/> 1°) Gravure SiO <sub>2</sub>	Buffer HF (temps $t_2$ d'après témoin)	
<input type="checkbox"/> 2°) Rinçage	Eau DI	
<input type="checkbox"/> 3°) Séchage	Tournette de séchage	
<input type="checkbox"/> 4°) Contrôle gravure	Microscope optique	
<input type="checkbox"/> 5°) Contrôle du dopage	Mesure $V/I$ sur la partie gauche du témoin après le traitement <b>n°2 du témoin</b>	



## VI. MÉTALLISATION FACE AVANT:

Cette opération consiste à déposer sur la face avant de la plaquette une couche d'aluminium de 5000Å environ, obtenue par pulvérisation cathodique ou par évaporation thermique. Dans les deux cas, il est nécessaire d'avoir un vide suffisant dans l'enceinte de dépôt pour garantir la pureté de la couche métallique.

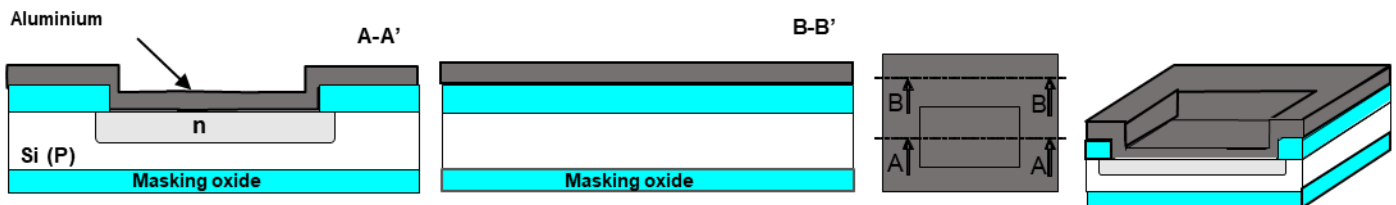
Il faudra noter les paramètres du dépôt dans l'un ou l'autre des tableaux suivants :

### - pour l'évaporation thermique :

Opérations	Conditions
<input type="checkbox"/> 1°) Dégazage	T(subst.) = °C Temps = min
<input type="checkbox"/> 2°) Dépôt	Pression avant dépôt = mbar Pression pendant dépôt = mbar

### - pour la pulvérisation cathodique :

Opérations	Conditions
<input type="checkbox"/> 1°) Dépôt	Pression avant dépôt = $10^{-7}$ mbar Pression pendant dépôt = $2 \cdot 10^{-3}$ mbar Puissance RF = 150 W Distance cible-substrat = 80 mm Temps de dépôt = 15 min



## VII. PHOTOGRAVURE N°2 (GRAVURE MÉTAL) :

Le deuxième niveau de masque a pour but de venir protéger les régions du composant où l'on souhaite conserver le dépôt d'aluminium (sur la cathode). Les conditions de la photolithographie sont résumées ci-dessous :

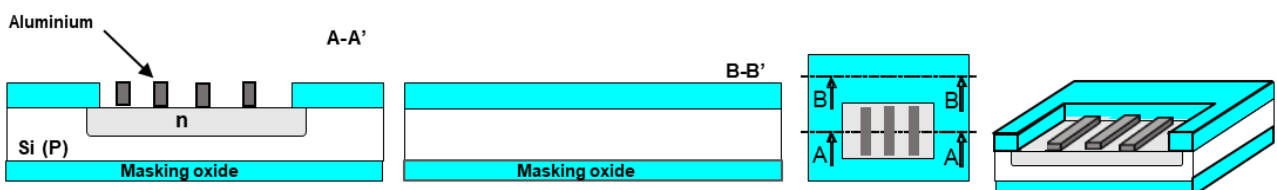
	<b>Visa de l'encadrant pour la poursuite des opérations</b>	▼
<b>Opérations</b>	<b>Conditions</b>	
<input type="checkbox"/> 1°) Homogénéiser le bain d'attaque Al*	Mettre le bain d'attaque dans les ultra-sons	
<input type="checkbox"/> 2°) Séchage	Plaque chauffante 120 °C – 2 min	
<input type="checkbox"/> 3°) Dépôt résine	Microposit S1813 (4000 tr/min – 30 s)	
<input type="checkbox"/> 4°) 1ère cuisson	Plaque chauffante 100°C - 1min	
<input type="checkbox"/> 5°) Alignement - Insolation	Masque n°2 – 5 s	
<input type="checkbox"/> 6°) Développement	Bain à 20°C- 20s	
<input type="checkbox"/> 7°) Rinçage	Eau DI	
<input type="checkbox"/> 8°) Séchage	Sécheuse	
<input type="checkbox"/> 9°) Observation	Microscope optique	
<input type="checkbox"/> 10°) 2ème cuisson	Plaque chauffante 120°C - 45s	

\* Le bain d'attaque de l'aluminium doit être parfaitement homogène pour son utilisation à l'étape 11. Dans ce but, on le plongera dans le bac à ultra-sons avant de commencer le dépôt de la résine (étape 2 du tableau ci-dessus).

La procédure à suivre pour la gravure métal est la suivante :

	<b>Visa de l'encadrant pour la poursuite des opérations</b>	▼
<b>Opérations</b>	<b>Conditions</b>	
<input type="checkbox"/> 11°) Gravure Aluminium**	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> +HNO <sub>3</sub> +H <sub>2</sub> O - contrôle visuel + 30 secondes supplémentaires	
<input type="checkbox"/> 12°) Rinçage	Eau DI	
<input type="checkbox"/> 13°) Séchage	Tournette de séchage	
<input type="checkbox"/> 14°) Contrôle Gravure	Microscope optique	

\*\* L'attaque de l'aluminium sera poursuivie pendant 20 ou 30 secondes au-delà de l'instant où tous les motifs de la tranche seront apparus.



<input type="checkbox"/> 15°) Protection face AV	Film UV	
<input type="checkbox"/> 16°) Désoxydation face AR	Buffer HF	
<input type="checkbox"/> 17°) Détachement Film UV	Lampe UV 5 mn	
<input type="checkbox"/> 18°) Dissolution résine	Acétone, eau DI	
<input type="checkbox"/> 19°) Séchage	Tournette de séchage	



## VIII. MÉTALLISATION FACE ARRIÈRE :

Cette opération consiste à déposer sur la face arrière de la plaquette composant une couche d'aluminium pleine plaque afin de pouvoir récupérer le contact de la zone P (anode). Cette couche sera obtenue par pulvérisation cathodique ou par évaporation thermique. Dans les deux cas, il est nécessaire d'avoir un vide suffisant dans l'enceinte de dépôt pour garantir la pureté de la couche métallique.

Il faudra noter les paramètres du dépôt dans l'un ou l'autre des tableaux suivants :

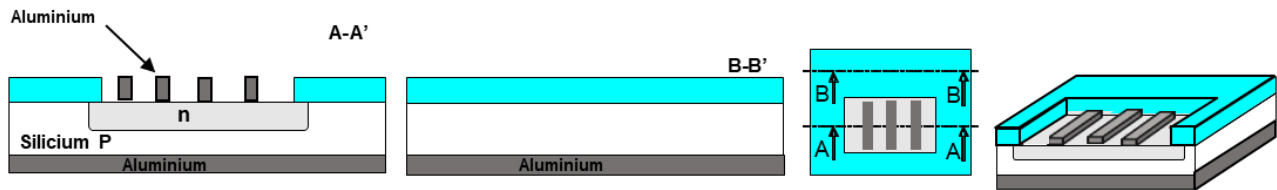
### - pour l'évaporation thermique :

Opérations	Conditions
<input type="checkbox"/> 1°) Dégazage	T(subst.) = °C Temps = min
<input type="checkbox"/> 2°) Dépôt	Pression avant dépôt = mbar Pression pendant dépôt = mbar

### - pour la pulvérisation cathodique :

Opérations	Conditions
<input type="checkbox"/> 1°) Dépôt	Pression avant dépôt = $10^{-7}$ mbar Pression pendant dépôt = $2 \cdot 10^{-3}$ mbar Puissance RF = 150 W Distance cible-substrat = 80 mm Temps de dépôt = 10 min





Au final, on procède à un recuit des différentes métallisations en une étape unique.

## RECUIT METAL

Température	Temps	Débits
400°C	20 min	$N_2 + H_2 (5\%) = 1 \text{ l/min}$

↳ Mesure d'épaisseur d'aluminium sur plaquette "composants" à l'aide du profilomètre

↳ Remplissez la 1ère partie de la feuille de résultats

## IX. ASSEMBLAGE:

### 1- Découpe :

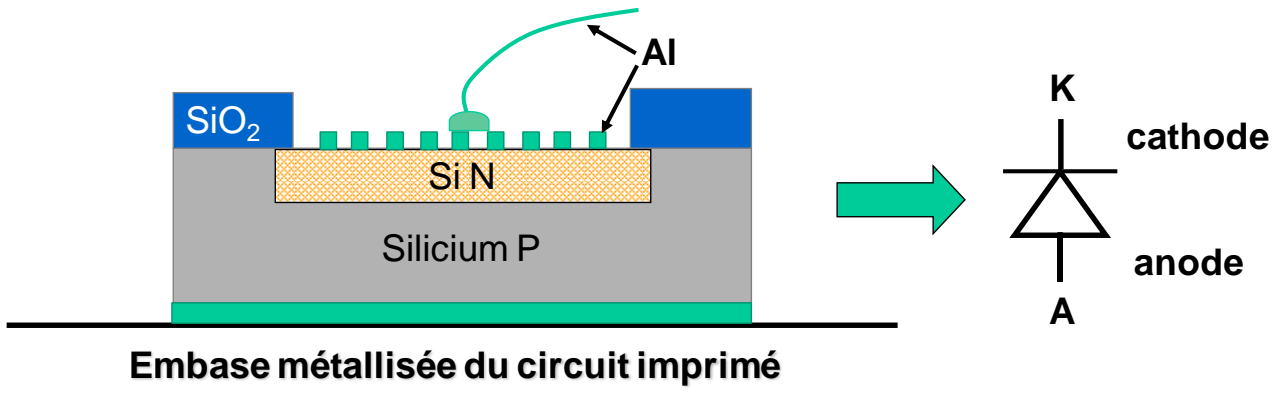
Une scie diamantée à commande numérique permet de découper la plaquette composante et d'individualiser les puces sélectionnées.

### 2- Montage :

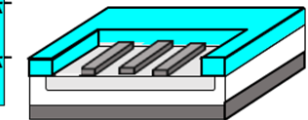
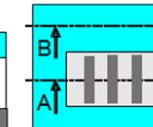
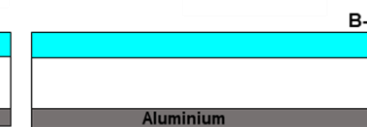
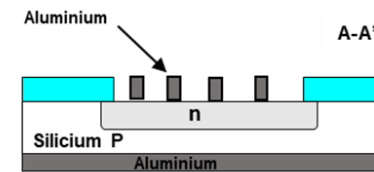
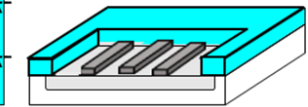
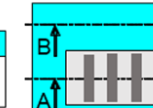
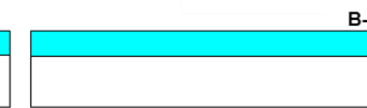
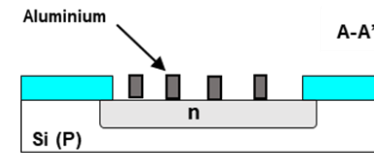
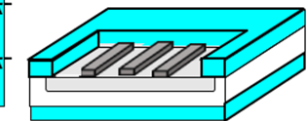
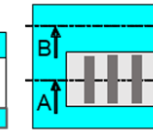
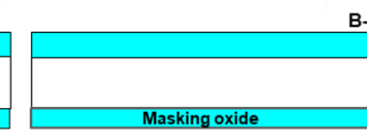
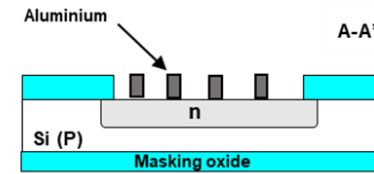
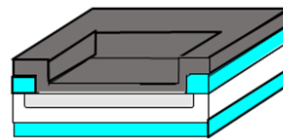
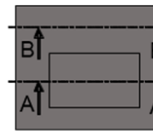
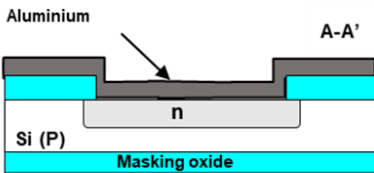
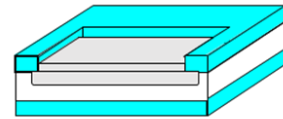
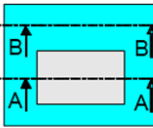
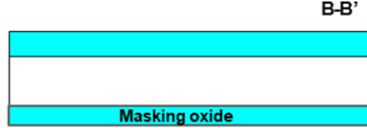
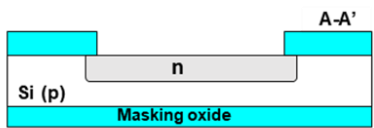
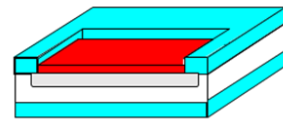
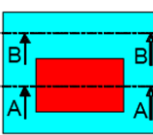
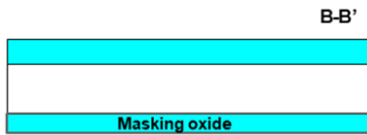
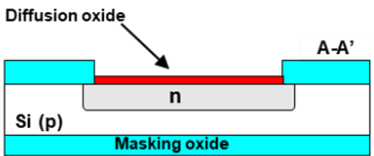
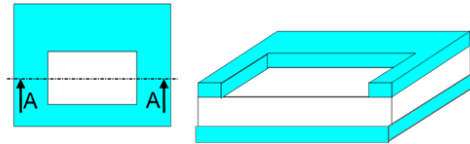
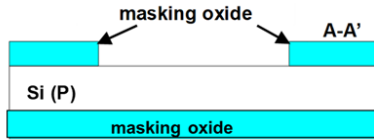
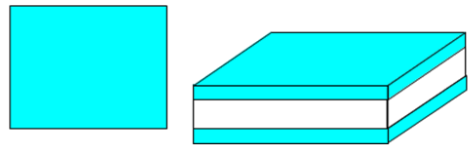
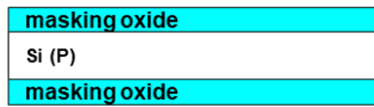
Les puces sont fixées par leur face arrière sur un circuit imprimé permettant de regrouper les quatre cellules élémentaires réalisées.

### 3- Micro-soudure :

Les contacts en face avant sont pris sur les plots métallisés de sortie à l'aide de fils d'aluminium qui doivent être soudés. La technique utilisée pour cela est celle du wedge-bonding faisant appel aux ultra-sons qui effectuent une interpénétration moléculaire entre le fil et le plot de contact. Cette étape est réalisée à la température ambiante.



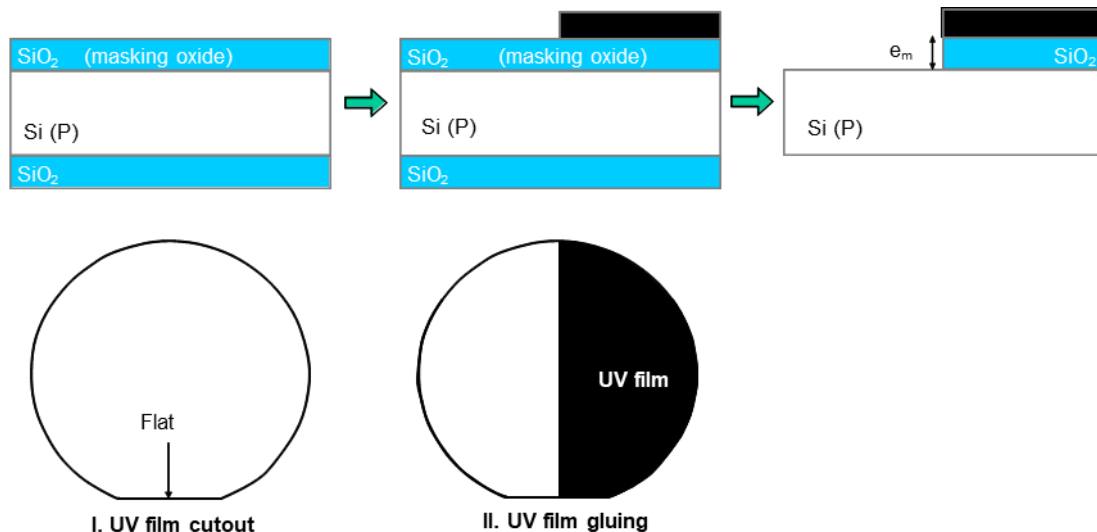
# VUES EN COUPE DES DIFFÉRENTES ÉTAPES DU PROCESS



## V- TRAITEMENT 1 TEMOIN

Le but de cette étape est de graver, à travers le masque de résine, l'oxyde de masquage et ainsi de délimiter les zones de la plaquette où apparaît le silicium nu. Ces régions sont appelées « fenêtres de diffusion » car c'est à travers elles que va s'effectuer la diffusion du dopant, l'oxyde masquant faisant par ailleurs office de barrière à la diffusion. Cette gravure est une gravure dite humide qui est réalisée en plongeant la plaquette dans une solution acide appropriée. Cette solution va graver sélectivement l'oxyde par rapport au silicium. Il est important de connaître le temps d'attaque du bain utilisé car il peut varier d'un bain à l'autre voire selon la température et l'âge de la solution. La détermination de cette vitesse, et donc du temps d'attaque à utiliser, sera effectuée sur la plaque témoin à l'aide des opérations suivantes.

Operations	Conditions
⇒ 1°) Film UV sur le témoin	Appliquer le film UV sur la moitié droite du témoin (côté plat vers le bas)
⇒ 2°) Attaque HF	Plonger le témoin dans le tampon HF en déterminant le temps d'attaque de l'oxyde épais
⇒ 3°) Retrait Film UV	Retirer le film UV (en plaçant l'indicateur 4 minutes sous la lampe UV ou en nettoyant à l'acétone)



### Nota :

1 - Toute solution aqueuse glisse sur le Si tandis qu'elle mouille sur le SiO<sub>2</sub>. L'attaque sera donc terminée lorsqu'on constatera visuellement que le HF ne tient plus sur la plaquette.

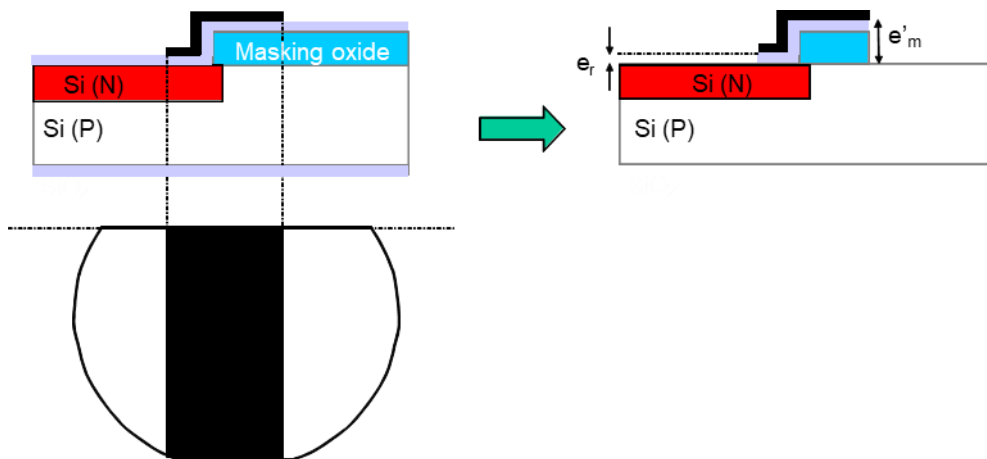
2 – Comment appliquer le film UV :

- Découper une portion de film légèrement plus grande que la surface à couvrir
- Enlever la pellicule protégeant la face collante et appliquer le film sur la surface en veillant surtout à ce qu'il adhère parfaitement aux bords de la surface à couvrir
- Après l'étape de gravure humide, placez le morceau de wafer pendant environ 4mn sous la lampe UV afin de dégrader la colle, et soulevez ensuite le film qui ne doit pratiquement plus opposer de résistance.

L'épaisseur de l'oxyde de masquage initial ( $e_m$ ) sera mesurée sur la plaquette témoin à l'aide du profilomètre (TENCOR) et de l'ellipsomètre, et sera reportée sur la fiche de caractérisation (p.20).

## TRAITEMENT 2 TEMOIN

Afin de reprendre les contacts cathodiques en face avant, l'oxyde de pré-dépôt sera gravé de manière à revenir au niveau de la surface du silicium dans les fenêtres de diffusion. Il faudra donc au préalable mesurer le temps d'attaque  $t_2$  nécessaire à cette gravure sur la partie gauche de la plaque témoin. En réalité, une légère sur-gravure sera réalisée pour être sûr d'éliminer tout l'oxyde et ainsi obtenir des contacts de bonne qualité.



Operations	Conditions
⇒ 1°) Film UV sur le témoin	Appliquer le film UV sur la moitié droite du témoin (côté plat vers le bas)
⇒ 2°) Attaque HF	Plonger le témoin dans le tampon HF en déterminant le temps d'attaque de l'oxyde
⇒ 3°) Retrait Film UV	Retirer le film UV (en plaçant l'indicateur 4 minutes sous la lampe UV ou en nettoyant à l'acétone)

**\* ÉTAPE DE CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX (valeurs à reporter dans la FICHE DE CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX – p.20) :**

- les épaisseurs des oxydes  $e'_m$  et  $e_r$  seront mesurées sur cette plaquette témoin à l'aide du profilomètre (TENCOR) et de l'ellipsomètre,
- la concentration en phosphore de la zone diffusée sera déduite de la profondeur de jonction  $x_j$  et du rapport  $V/I$  obtenu à partir de mesures effectuées sur la partie gauche du témoin,
- la concentration en bore du substrat de départ sera déduite des mesures effectuées soit sur la bande désoxydée de la plaque témoin de l'étape 3), soit sur la partie droite de la plaque témoin.

## FICHE DE CARACTÉRISATION MATÉRIAU

<b>Caractérisation du substrat de départ</b>		
1°) Épaisseur wafer	$e =$	$\mu\text{m}$
2°) Méthode « 4 pointes »	$V/I =$	$\Omega$
3°) Résistance/carré	$R_{\square} =$	$\Omega/\square$
4°) Résistivité	$\rho_s =$	$\Omega.\text{cm}$
5°) Concentration dopant	$N_A =$	$\text{at}.\text{cm}^{-3}$

<b>Épaisseurs d'oxydes</b>		
1°) Oxyde de masquage initial	$e_m =$	$\mu\text{m}$
2°) Oxyde de diffusion	$e_d =$	$\mu\text{m}$
3°) Oxyde de masquage final	$e'_m =$	$\mu\text{m}$

<b>Caractérisation de la diffusion</b>		
1°) Méthode « 4 pointes »	$V/I =$	$\Omega$
2°) Résistance/carré	$R_{\square} =$	$\Omega/\square$
3°) Profondeur de jonction	$x_j =$	$\mu\text{m}$
4°) Résistivité couche diffusée	$\rho_d =$	$\Omega.\text{cm}$
5°) Concentration en surface	$C_s =$	$\text{cm}^{-3}$

## CARACTÉRISATION ÉLECTRIQUE DES CELLULES SOLAIRES

L'effet photovoltaïque découvert par Edmond Becquerel en 1839 a mis en évidence le fait que des matériaux comme le silicium émettent de l'électricité quand ils reçoivent de la lumière. Il est mis en application dans les cellules photovoltaïques, petits composants électroniques à base de silicium. Sans pièce mécanique, sans bruit, sans production de polluants, elles convertissent directement l'énergie solaire en électricité, sous forme de courant continu.

Il existe trois principales qualités de cellules en silicium :

- **le silicium monocristallin** : c'est le plus onéreux mais son rendement (de 12 à 17%) est supérieur aux autres qualités,
- **le silicium polycristallin** : c'est le plus courant actuellement sur le marché car moins onéreux même si son rendement est un peu plus faible,
- **le silicium amorphe** : moins performant, il est nettement moins cher car il peut être fabriqué par vaporisation sur un support (plastique, verre, etc)

Chaque cellule photovoltaïque délivre un courant sous une tension qui lui est propre. Sa tension lorsqu'aucun courant ne circule à ses pôles est appelée "tension en circuit ouvert" ( $V_{co}$ ) et le courant circulant lorsqu'il n'y a aucune tension est le "courant de court-circuit" ( $I_{cc}$ ). Ce sont les deux situations extrêmes de la cellule pour laquelle aucune puissance n'est délivrée par la cellule. On recherche toujours à éviter cette situation en faisant fonctionner le panneau solaire photovoltaïque avec une tension et un courant à puissance maximale ( $V_m$  et  $I_m$ ). Ces deux paramètres servent à déterminer le rendement nominal du panneau photovoltaïque dont la puissance est alors exprimée en  $W_c$  (Watt crête).

A chaque cellule sont donc attachées des caractéristiques précises obtenues en usine aux conditions "normales" et listées ci-dessous :

<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Courant de court circuit : <math>I_{cc}</math> (A)</b></li> <li>- <b>Tension en circuit ouvert : <math>V_{co}</math> (V)</b></li> <li>- <b>Facteur de Forme (filling factor) : FF</b></li> <li>- <b>Point de fonctionnement : <math>(V_m, I_m) \Rightarrow P_m</math></b></li> <li>- <b>Rendement de conversion optimum : <math>\eta</math></b></li> </ul>	
--	--

- **Le paramètre FF** est le facteur de remplissage ou facteur de forme, il mesure le caractère rectangulaire de la courbe  $I(V)$ . Il peut varier de 0.25 pour une cellule à faible rendement à 0.9 pour une cellule idéale. Il peut être défini par :

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}}$$

- **Le rendement de conversion optimum** est défini par le rapport de la puissance électrique maximale disponible à la puissance lumineuse incidente :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{solaire}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{solaire}}$$

Assemblées en série, les cellules fournissent la tension et le courant électrique utiles, on obtient ainsi des modules photovoltaïques. Ce sont eux qu'on commercialise. Le matériau utilisé étant très fragile, il est nécessaire de le protéger des intempéries par un verre transparent et solide. Les enveloppes employées actuellement sont étudiées pour résister de vingt à trente ans aux agressions de l'environnement.

L'objet de cette séance de caractérisation est de vous faire découvrir les cellules solaires, les panneaux solaires (modules) et acquérir quelques notions de radiométrie.

**Les expériences installées en salle de caractérisation** vous permettront d'aborder plusieurs problématiques liées à la production d'énergie électrique à partir de l'énergie lumineuse :

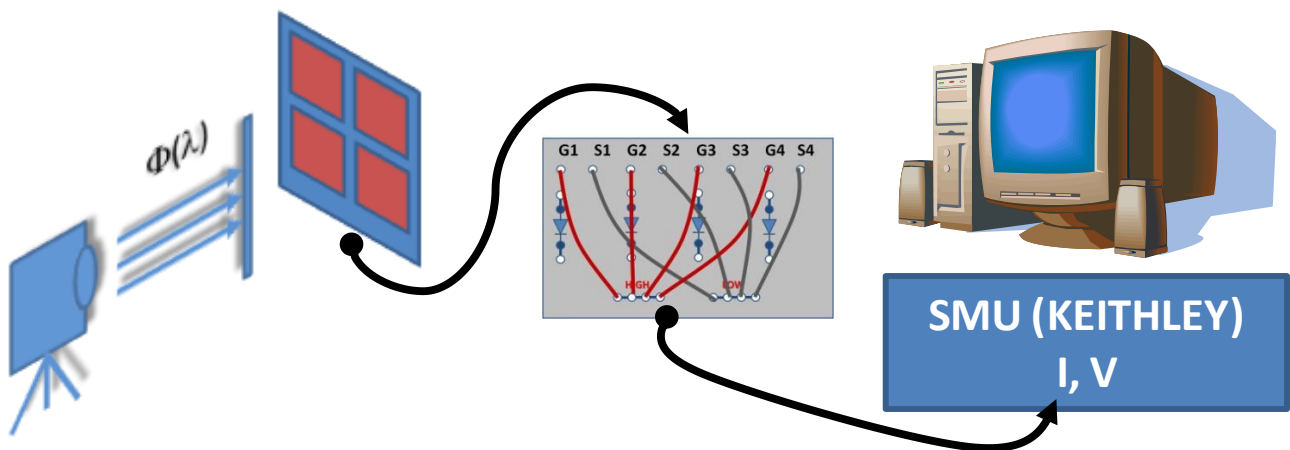
- Tracer et comprendre une caractéristique de cellule solaire,
- Monter en série et en parallèle des cellules solaires pour la réalisation d'un module,
- Mettre en évidence les effets d'ombrage.

Au programme des caractérisations :

- Dans un premier temps, nous tracerons et commenterons les caractéristiques  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$  d'une cellule photovoltaïque (notée en abrégé "cellule PV").
- Dans un deuxième temps, nous étudierons les associations série et parallèle de cellules afin d'augmenter la puissance électrique disponible.

## 1 - Protocole de caractérisation des cellules et modules photovoltaïques :

### Montage et réglages préliminaires :



- Le relevé des caractéristiques  $I=f(V)$  se fait avec le SMU (Source Monitor Unit) du KEITHLEY piloté par le PC.



## 2 - Relevé de la caractéristique d'une seule cellule PV :

- Réglez le banc de manipulation,
- Réalisez les mesures  $I(V)$  de 0 à 100% d'éclairement par pas de 20%,
- Remplissez le tableau suivant pour la puissance lumineuse incidente maximale (100%) :

<b>Tension de circuit ouvert <math>V_{CO}</math> (mV)</b>	$V_{CO} =$
<b>Courant de court-circuit <math>I_{CC}</math> (mA)</b>	$I_{CC} =$
<b>Puissance électrique maximale <math>P_{MAX}</math> (mW)</b>	$P_{MAX} =$
<b>Rendement de conversion optimum <math>\eta</math> (%)</b>	$\eta =$

- Quel paramètre de la caractéristique  $I=f(V)$  de la cellule l'éclairement fait-il varier ?
- Donner les coordonnées (V, I, P) ainsi qu'un nom à ce point particulier où cette puissance est maximale.
- D'après le domaine de variation autour de ce point, la cellule se comporte-t-elle comme un générateur de courant ou de tension ?

## 3 - Relevé des caractéristiques $I(V)$ des autres cellules PV :

- Réglez le banc de manipulation au maximum de sa puissance lumineuse incidente.
- Réalisez les mesures  $I(V)$  à 100% d'éclairement pour chacune des trois autres cellules
- Remplissez le tableau suivant pour chaque cellule :

<b>Tension de circuit ouvert <math>V_{CO}</math> (mV)</b>	$V_{CO} =$
<b>Courant de court-circuit <math>I_{CC}</math> (mA)</b>	$I_{CC} =$
<b>Puissance électrique maximale <math>P_{MAX}</math> (mW)</b>	$P_{MAX} =$
<b>Rendement de conversion optimum <math>\eta</math> (%)</b>	$\eta =$

## 4 - Association de cellules : module solaire :

On veut augmenter la puissance disponible du générateur. Pour cela on réalise une association de plusieurs cellules nommé "module". **Dans toute la suite du TP, on se placera dans les conditions d'éclairement maximum.**

### 4.1 - Association Série :

- Lorsque des générateurs sont associés en série, quelle est la grandeur électrique commune ?
- Quelle grandeur électrique augmente-t-on en associant des générateurs en série ?
- Réaliser l'association en série **de deux cellules** et refaire les mêmes mesures qu'à la question 2 :

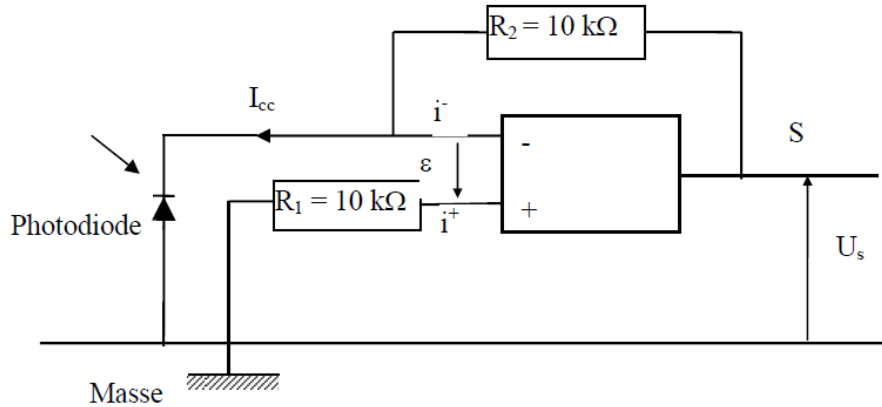
<b>Tension de circuit ouvert <math>V_{CO}</math> (mV)</b>	$V_{CO} =$
<b>Courant de court-circuit <math>I_{CC}</math> (mA)</b>	$I_{CC} =$

Puissance électrique maximale $P_{MAX}$ (mW)	$P_{MAX} =$
--	-------------

**4.2 - Association Parallèle :**

**4.2.1 - Association simple :**

- a) Quand des générateurs sont associés en parallèle, quelle est la grandeur électrique commune ?
- b) Quelle grandeur électrique augmente-t-on en associant des générateurs en parallèle ?
- c) Réaliser l'association en parallèle de deux cellules, éclairez-les simultanément avec la même intensité lumineuse et **mesurez  $V_{CO}$  à l'aide d'un multimètre et  $I_{CC}$  à l'aide du montage suivant :**



Tension de circuit ouvert $V_{CO}$ (mV)	$V_{CO} =$
Courant de court-circuit $I_{CC}$ (mA)	$I_{CC} = U_s / R_2$
Puissance électrique maximale $P_{MAX}$ (mW)	$P_{MAX} =$

- d) Que pouvez-vous en déduire sur le mode de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque ?

**4.2.2 - Association avec diode anti-retour :**

Lorsque les panneaux solaires sont associés en parallèle, il est nécessaire de placer une **diode anti-retour** (DAR) en série avec chaque cellule ou module. En effet, en cas de déséquilibre d'ensoleillement entre panneaux, il ne faut pas que les modules les plus éclairés débitent du courant dans les modules les moins éclairés (au risque de les endommager). Dans le cas où les cellules chargeraient une batterie ces diodes protègent également du courant que la batterie pourrait débiter pendant les périodes de faible ensoleillement.

Réaliser l'association en parallèle avec DAR de deux cellules et refaire les mêmes mesures **qu'à la question 4.2.1 en condition d'éclairement maximum :**

- a) Relevez les caractéristiques  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$  des deux cellules associées en parallèle avec DAR,

Tension de circuit ouvert $V_{CO}$ (mV)	$V_{CO} =$
Courant de court-circuit $I_{CC}$ (mA)	$I_{CC} =$
Puissance électrique maximale $P_{MAX}$ (mW)	$P_{MAX} =$

- b) Que vaut ici la puissance électrique maximale ?
- c) Comparez-là à celle d'une seule cellule et à celle du montage série. D'où viennent les différences ?
- d) Quel est la tension de seuil des DAR ? La vérifier éventuellement avec le multimètre en position "test diode",
- e) Quelle est la puissance électrique perdue  $P_p$  à cause des diodes DAR ?

#### **4.3 - Association Série & Parallèle :**

- a) Lorsque des générateurs sont associés en série et en parallèle, quelle sont les grandeurs électriques communes ?
- b) Réalisez l'association en **parallèle de deux branches contenant chacune une association série de deux cellules**, éclairez-les simultanément avec la même intensité lumineuse et refaire les mêmes mesures qu'à la question précédente :

<b>Tension de circuit ouvert <math>V_{CO}</math> (mV)</b>	$V_{CO} =$
<b>Courant de court-circuit <math>I_{CC}</math> (mA)</b>	$I_{CC} =$
<b>Puissance électrique maximale <math>P_{MAX}</math> (mW)</b>	$P_{MAX} =$

#### **5 - Exploitation du module solaire :**

Nous mettons à votre disposition :

- Un moteur surmonté d'un ventilateur
- Une LED rouge « classique »

**Trouvez et réalisez le ou les montages permettant de faire fonctionner :**

**1 - le moteur**

**2 - la LED**

**3 - le moteur et la LED en même temps.**

Extrait de la Datasheet d'une LED rouge de chez VISHAY :

**TLHK5800**

Vishay Semiconductors



<b>OPTICAL AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS <sup>1)</sup> RED</b>						
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Luminous intensity <sup>2)</sup>	$I_F = 20 \text{ mA}$	$I_V$	1000	5500		mcd
Dominant wavelength	$I_F = 10 \text{ mA}$	$\lambda_d$		630		nm
Peak wavelength	$I_F = 10 \text{ mA}$	$\lambda_p$		643		nm
Angle of half intensity	$I_F = 10 \text{ mA}$	$\phi$		$\pm 4$		deg
Forward voltage	$I_F = 20 \text{ mA}$	$V_F$		1.9	2.6	V
Reverse voltage	$I_R = 10 \text{ }\mu\text{A}$	$V_R$	5			V
Junction capacitance	$V_R = 0, f = 1 \text{ MHz}$	$C_j$		15		pF

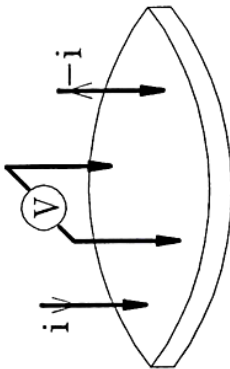
### Mesure 4 pointes

#### 1. Mesure $V/I$ sur une couche mince d'épaisseur $e$ et de résistivité $\rho$

Si l'épaisseur est négligeable par rapport aux autres dimensions, on peut construire un modèle bidimensionnel de la conduction qui donne :

$$\frac{V}{I} = K \cdot \frac{\rho}{e} \quad (1)$$

$K$  étant un coefficient sans dimension caractéristique de la géométrie 2D (forme des contours, position des contacts).



$$\frac{V}{I} = K \cdot R_{\square} \quad (2)$$

Le rapport  $\rho/e$  caractérise la couche, on le note  $R_{\square}$ . On a alors :

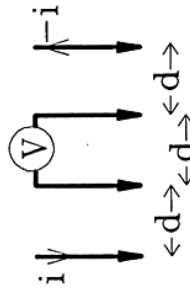
(N.B.  $R_{\square}$  s'exprime en Ohms)

#### 2. Valeur de $K$ (cas particulier)

Le coefficient  $K$  peut être calculé analytiquement dans quelques cas particuliers très simples, par exemple pour 4 pointes alignées équidistantes sur une couche sans limites (infinie) :

$$K = \frac{\log(2)}{\pi} \quad (3)$$

(valeur pratique :  $1/K = 4.532$ )



#### 3. Cas d'une couche dopée

La résistivité n'est pas uniforme sur l'épaisseur  $e$ , mais les formules (2) et (3) sont toujours applicables, par généralisation de l'utilisation de  $R_{\square}$ .

On définit alors une résistivité moyenne  $\rho_m$  telle que :

$$R_{\square} = \frac{\rho_m}{e} \quad (4)$$

Si la loi de distribution du dopant est connue, on peut déduire de  $\rho_m$  la concentration en surface et pour différentes profondeurs (voir abaques).

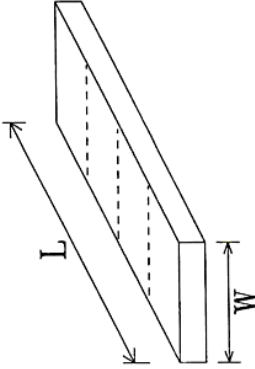
#### 4. Relation avec le dessin de masques

Résistance d'une piste conductrice de longueur  $L$  et de largeur  $W$  (un parallélogramme) :

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} = \rho \cdot \frac{L}{eW} = \frac{L}{W} \cdot R_{\square} \quad (5)$$

où  $L$  et  $W$  caractérisent le dessin des masques alors que  $R_{\square}$  caractérise la technologie.

Le rapport  $L/W$  peut être considéré comme une "nombre de carrés", d'où l'appellation de  $R_{\square}$  : "résistance par carré".



#### 5. Cas d'une épaisseur non négligeable

Si l'épaisseur de la couche n'est pas négligeable mais encore raisonnablement petite, on peut appliquer les formules (2) et (3) en remplaçant  $K$  par un coefficient  $K'$  corrigé, fonction du rapport entre l'épaisseur et les autres dimensions.

Dans le cas des 4 pointes équidistantes de distance  $d$ , la correction est négligeable tant que :

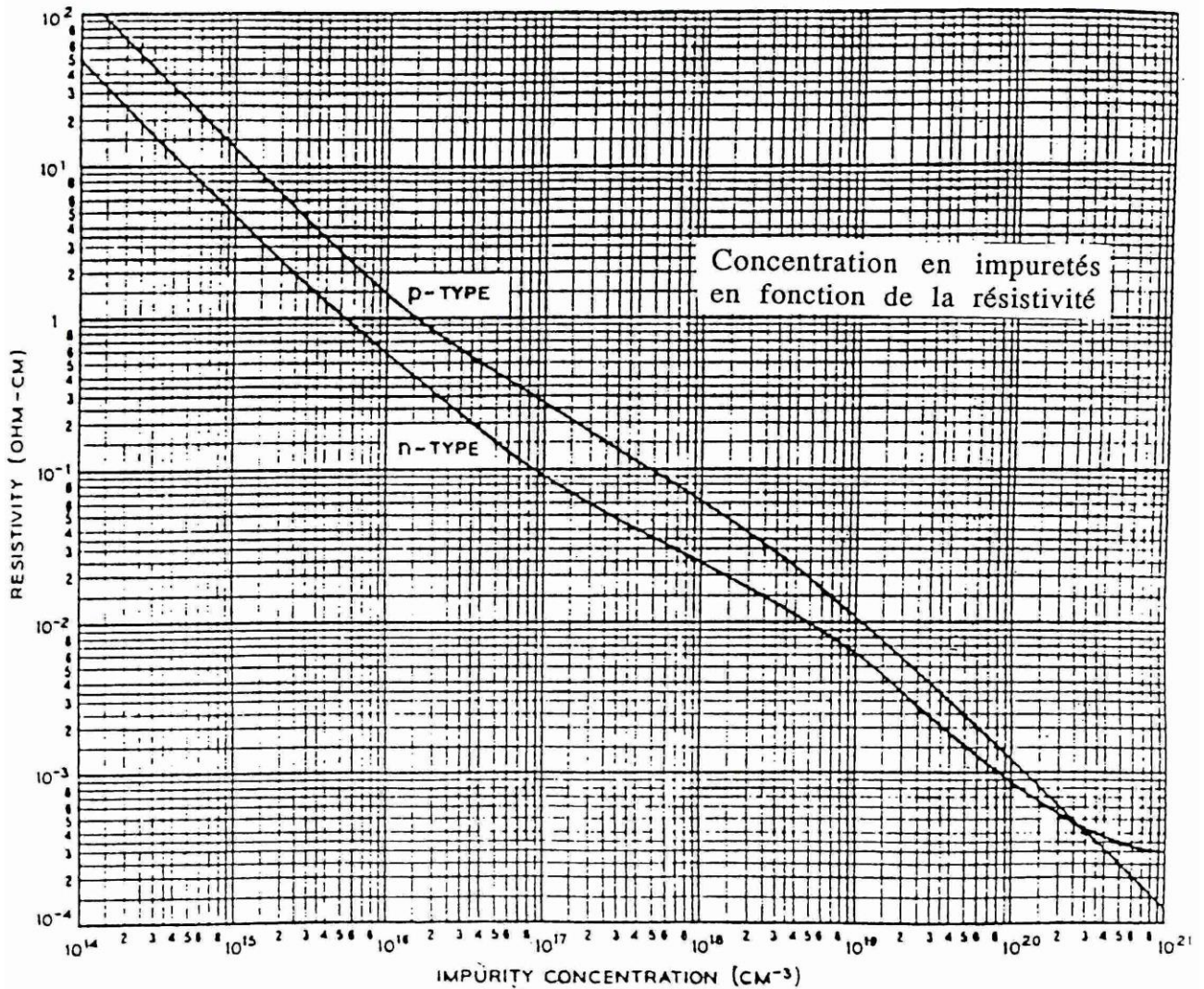
$$\frac{e}{d} < 0.25$$

#### Méthode Pratique pour la mesure 4 pointes :

- effectuer une mesure  $V/I$  pas trop près des bords de l'échantillon
  - exprimer la mesure en Ohms
  - multiplier par 4.532 pour obtenir  $R_{\square}$ , noter ce résultat (toujours en Ohms) (la distance entre pointes étant de 1.59 mm, la correction d'épaisseur n'est pas nécessaire)
  - exprimer l'épaisseur  $e$  de la couche en cm
  - multiplier  $R_{\square}$  par  $e$  pour obtenir la résistivité  $\rho$  ou  $\rho_m$ , noter ce résultat (en Ohm.cm)
  - utiliser un abaque pour en déduire la concentration de dopant (après éventuellement calcul de la conductivité en  $\text{Ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ).
- ATTENTION : ce n'est pas le même abaque selon que le dopage est uniforme (substrat, polysilicium déposé) ou non (couche diffusée ou implantée).



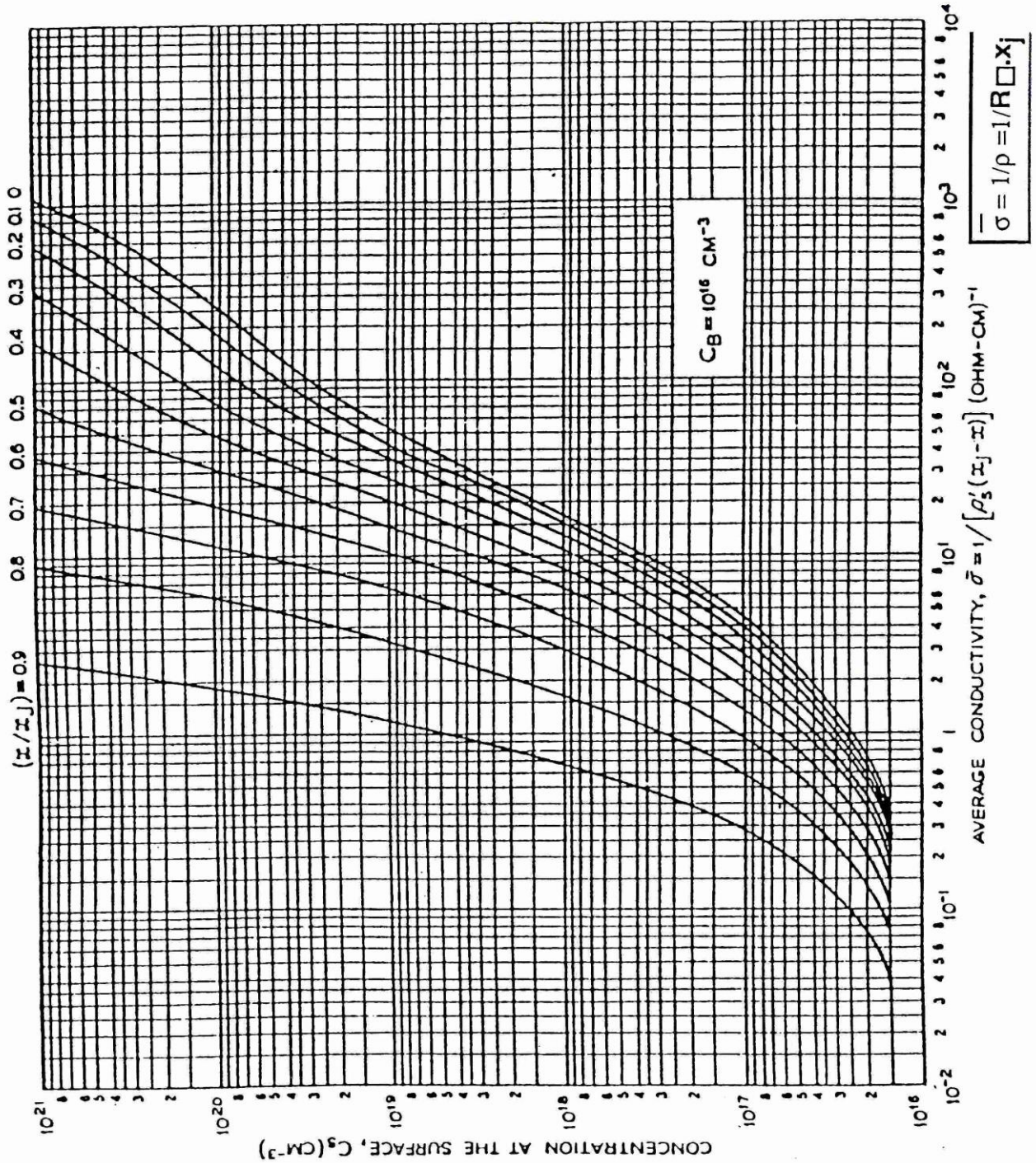
## DETERMINATION DU DOPAGE DU SUBSTRAT DE DEPART



Resistivity of silicon at 300°K as a function of acceptor or donor concentration.



## DETERMINATION DU DOPAGE DES COUCHES DIFFUSEES APRES PREDEPOT



**MESURE DES PROFONDEURS DE JONCTIONS**

**DEFINITION :**

$x_j$  est la distance comptée à partir de la surface de silicium telle que

$$C(x_j) = C_B$$

$C(x)$  correspondant au profil de dopage de la zone diffusée et  $C_B$  à celui du substrat.

**MODE OPERATOIRE :**

a- Rodage mécanique de l'échantillon par un cylindre de rayon  $R$  enduit de pâte diamantée pour obtenir une empreinte de profondeur supérieure à  $x_j$ .

b- Révélation chimique qui colore différemment la zone N et la zone P.

c- Observation sous microscope et mesure des quantités  $x$  et  $y$  (fig. 3).

**CALCUL DE  $x_j$  :**

Avec les notations de la figure, les longueurs mesurées  $x$  et  $y$  sont telles que :

$$\left. \begin{aligned} x &= a - b \\ y &= a + b \end{aligned} \right\} xy = a^2 - b^2$$

Par ailleurs de simples considérations géométriques conduisent à :

$$\begin{aligned} x_j &= \{R^2 - b^2\}^{\frac{1}{2}} - \{R^2 - a^2\}^{\frac{1}{2}} \\ &\approx R \left\{ \left( 1 - \frac{b^2}{2R^2} \right) - \left( 1 - \frac{a^2}{2R^2} \right) \right\} = \frac{xy}{2R} \\ &= \frac{xy}{2R} \end{aligned}$$

Compte tenu du rayon du cylindre  $R = 1,25 \text{ cm}$  et du grossissement du microscope, on a :

objectif x3,2 1 division tambour  $\rightarrow 1 \mu\text{m}$  et

$$x_j (\mu\text{m}) = 39,9 \cdot 10^{-6} x_{(\text{div})} \cdot y_{(\text{div})}$$

objectif x5 1 divison tambour  $\rightarrow 0,6 \mu\text{m}$  et

$$x_j (\mu\text{m}) = 14,40 \cdot 10^{-6} x_{(\text{div})} \cdot y_{(\text{div})}$$

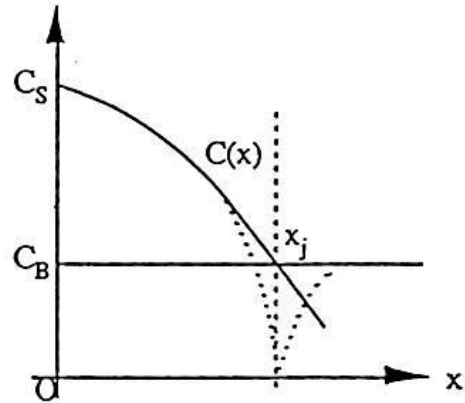


Figure 1

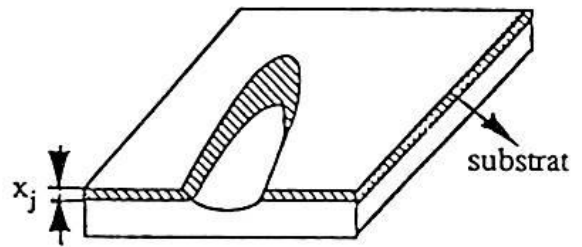


Figure 2

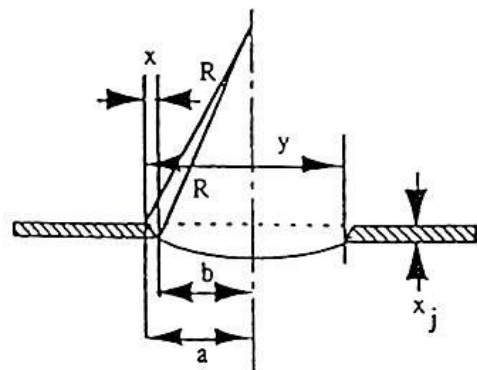
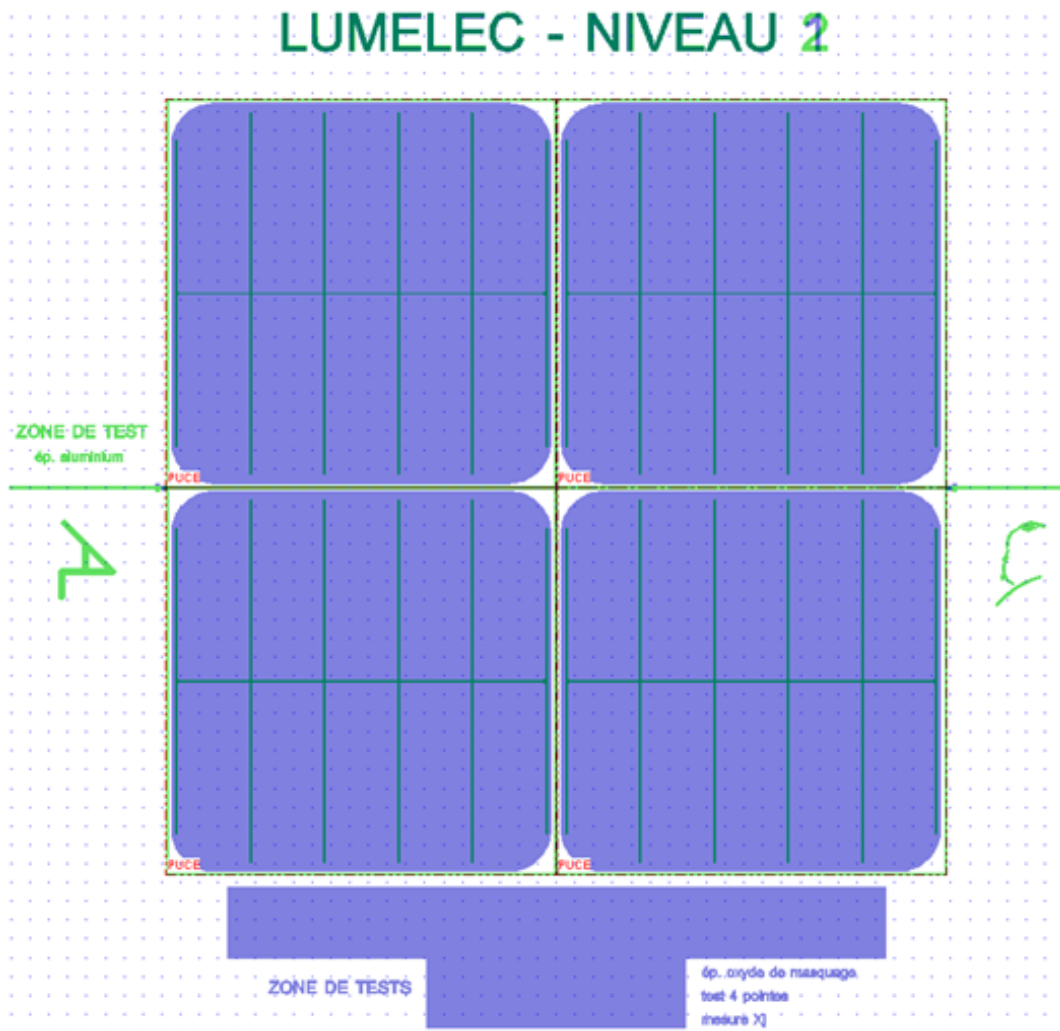
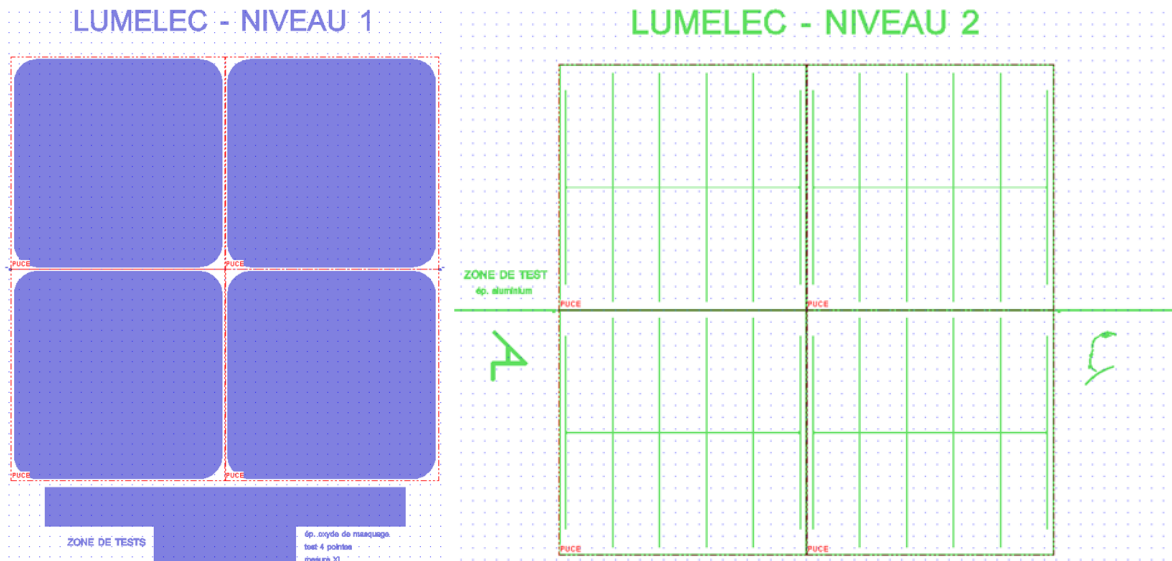


Figure 3

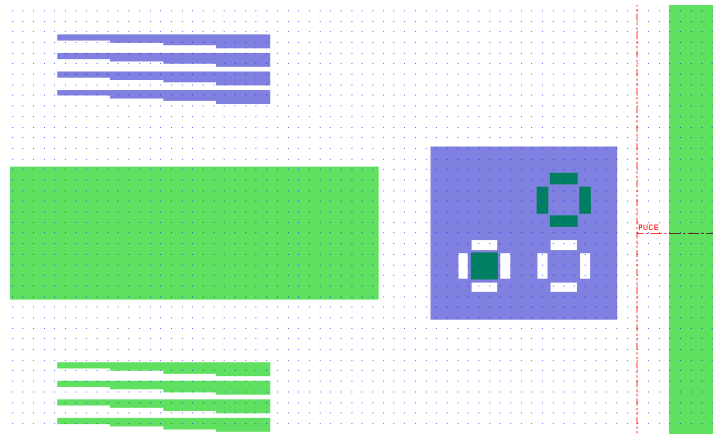


# LES MASQUES DE LUMELEC

## 1 - LES NIVEAUX :



## 2 - LES MARQUES D'ALIGNEMENT :



## 3 - LES ZONES DE TESTS :

<p>Zone de test pour l'épaisseur d'aluminium</p>	<p>Zone de test pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- L'épaisseur d'oxyde de masquage,</li> <li>- les tests « 4 points » et</li> <li>- la mesure du xj</li> </ul>
<p><b>ZONE DE TEST</b> ép. aluminium</p>	