

♣ INTRODUCTION ET GENERALITES SUR LE DOPAGE

♣ **Dopage** : Le dopage est une méthode permettant d'augmenter la conductivité d'un semi-conducteur. Cela consiste à introduire des impuretés dans un cristal intrinsèque pour modifier ces propriétés électriques. Le semi-conducteur dopé est alors appelé 'semi-conducteur extrinsèque'.

♣ Les trois méthodes de dopage

♥ **La diffusion** : On utilise un four, dans lequel on injecte des gaz, avec une solution dopante pour le silicium. Avec la chaleur, le dopant a une énergie suffisante pour entrer dans la plaquette de silicium. Cette méthode est assez ancienne, et nécessite d'avoir une température uniforme dans le four.

♥ **La croissance épitaxiale** : Cette méthode utilise toujours un four, mais cette fois-ci les atomes du dopant sont déposés sur la plaquette. On a ainsi un dépôt, et non une insertion : c'est donc une méthode moins barbare que la diffusion. La température du four doit avoisiner les 1200°C.

♥ **Le bombardement ionique** : Une source produit des ions, qui sont ensuite accélérés, et par le biais d'un contrôle très précis, les ions vont aller se positionner sur la plaquette. L'avantage de ce principe est que l'opération se déroule à température ambiante. Le processus reste cependant barbare, car les ions doivent se frayer un chemin dans le réseau, il faut donc recuire la plaquette obtenue pour donner de l'énergie aux atomes pour qu'ils se replacent dans le réseau.

♣ Les sept étapes de la réalisation d'un circuit intégré :

- 1) Achat d'un cristal de silicium (gros comme un concombre)
- 2) Découpe en tranches de 1µm à 1mm
- 3) On effectue la diffusion (avec un masque)
- 4) Tests des cristaux
- 5) Découpe au diamant, afin d'obtenir la puce
- 6) Mise en boîtier de la puce
- 7) Tests et commercialisation

♣ LE COURANT DE DIFFUSION

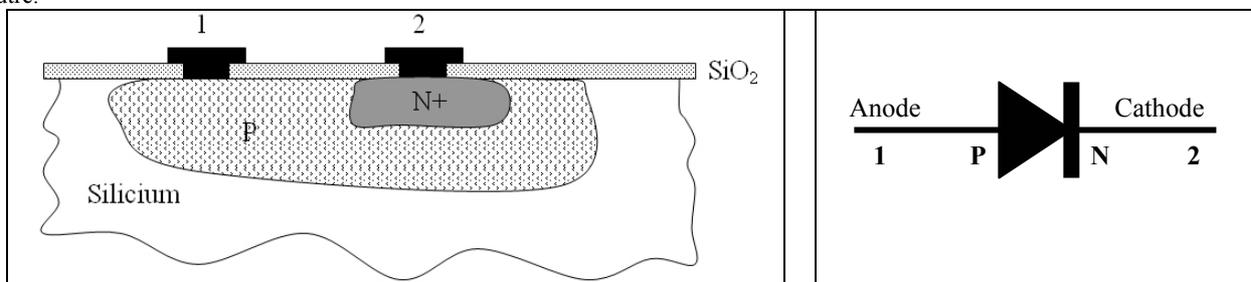
♣ **Origine** : Lorsque dans une région du semi-conducteur on va créer des paires « électrons – trous » en excès par rapport au reste du volume, il y a une tendance de diffusion des porteurs vers la région à faible concentrations. Cette diffusion est indépendante de la charge des porteurs, ou du champ électrique.

♣ **Expression** : $J_N = -q \cdot D_N \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(n) = -q \cdot D_N \cdot \frac{dn}{dx}$

♣ **Relation d'Einstein** : $\frac{D_P}{\mu_P} = \frac{D_N}{\mu_N} = V_{THERMIQUE} \Leftrightarrow V_{THERMIQUE} = \frac{K_{BOLTZMAN} \cdot T}{q} \Leftrightarrow V_{THERMIQUE} \approx 26mV @ T^\circ \text{ ambiante}$.

♣ LA JONCTION PN (DIODES SEMI-CONDUCTRICES)

♣ **Définition** : Une jonction PN est un dispositif semi-conducteur à deux bornes, qui conduit le courant plus facilement dans une direction que dans l'autre.



♣ **Contact ohmique** : C'est un contact dont la résistance ne dépend ni de la valeur du courant, ni de son sens.

♣ **Généralités** : Dans la zone dopée, les trous ou les électrons, selon le cas, sont appelés porteurs de charges majoritaires. En dopant respectivement N et P deux parties d'un même cristal semi-conducteur, on forme un dipôle appelé diode à jonction. La jonction est la surface de contact située entre les deux parties du cristal dopé différemment.

♣ **Modèle mathématique** : $V_0 = \frac{K_{BOLTZMAN} \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}\right) \Leftrightarrow V_0 = V_{THERMIQUE} \cdot \ln\left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}\right)$

♣ **Expression de l'épaisseur** : $d_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_R \cdot V_0}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)}$ et on a aussi $E_0 = \frac{V_0}{d_0}$

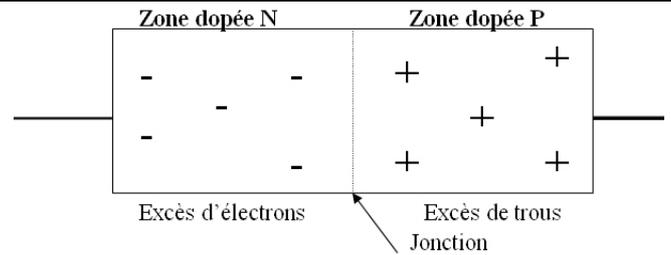
♣ COMPORTEMENTS PARTICULIERS DE LA DIODE :

EFFET AVALANCHE	On a un porteur qui se trouve accéléré par le champ électrique, et qui va entrer en collision avec un autre porteur, qui lui va à son tour entrer en contact avec un autre porteur, et ainsi de suite. Cela va donner naissance à un courant. Cela se produit en polarisation inverse, pour des tensions relativement élevées.
EFFET ZENER	Il consiste en la rupture des liaisons covalentes à l'intérieur de la région dépeuplée, à cause du champ électrique fort imposé pour la polarisation. L'effet Zener apparaît <u>AVANT</u> l'effet avalanche.

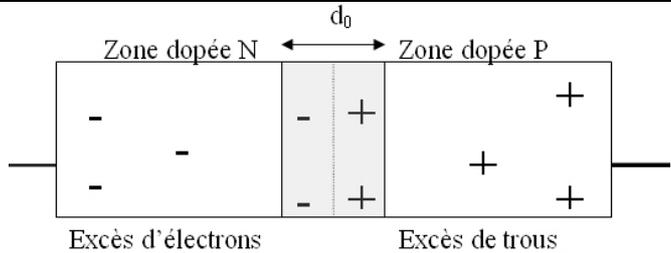
♣ **MODELE MATHEMATIQUE DE LA DIODE** : $I = I_{SATURATION} \cdot \left[\exp\left\{\frac{V}{\eta \cdot V_T}\right\} - 1 \right]$, avec $I_{SATURATION} \approx 10^{-15} A$

♣ INFORMATIONS SUR LA JONCTION PN SANS POLARISATION

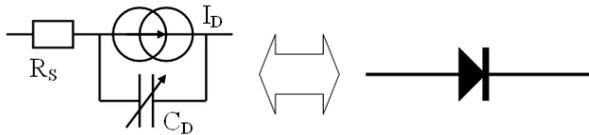
Au départ chacune des deux zones est électriquement neutre. La mise en contact des deux parties induit un phénomène de migration de porteurs majoritaires de part et d'autres de la jonction : certains trous de la zone P se déplacent vers la zone N, qui contient des donneurs d'électrons, tandis que certains électrons de la zone N migrent vers la zone P, qui contient des accepteurs d'électrons.



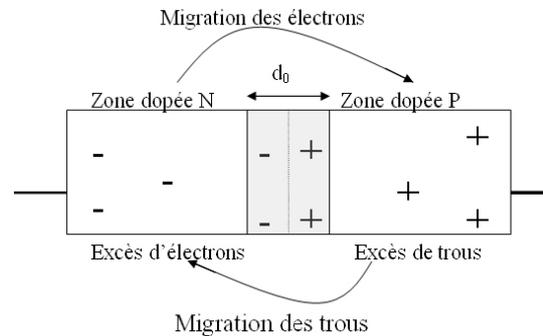
Un équilibre s'établit autour de la jonction, créant ainsi un champ électrique interne E. La zone située autour de la jonction correspondant à la présence de ce champ électrique est appelée zone de déplétion. Ce champ électrique est concomitant à l'apparition d'une différence de potentiel de part et d'autre de la zone de déplétion. Cette différence de potentiel est appelée barrière de potentiel.



La zone centrale est donc un isolant (car elle est neutre), et comme il y a de part et d'autre des zones chargées, on a alors une capacité, appelée capacité de diffusion.



Le schéma ci-dessus est le schéma équivalent de la diode...



♣ POLARISATION DIRECTE ET POLARISATION INVERSE. DE LA JONCTION PN :

	POLARISATION DIRECTE	POLARISATION INVERSE
Schéma I		
Schéma II		
Notes	La barrière de potentiel est diminuée. Trous et électrons sont stimulés à passer la jonction. Le courant circulant dans le circuit est important. Les capacités de diffusion et de transition augmentent.	Idéalement le courant traversant la diode, est nul, car il n'y a pas de porteurs qui traversent la jonction. Dans la pratique ce courant est de quelques nano ampères. La capacité de diffusion est nulle, et la capacité de transition est relativement faible.

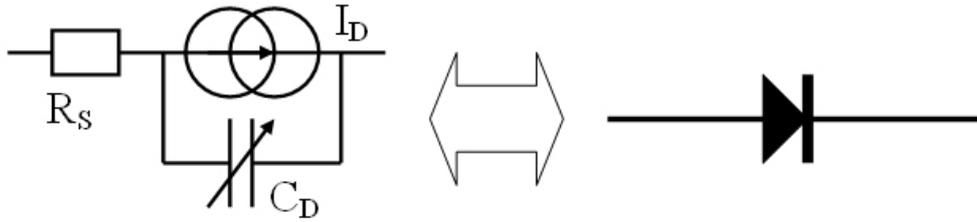
♣ LES CAPACITES DE LA DIODE

$$C_{DIODE} = C_{JONCTION} + C_{DIFFUSION}$$

Polarisation directe	$C_{JONCTION} \approx 2.C_{J0}$	$C_{DIFFUSION} = \frac{\tau_{FORWARD}}{\eta V_T} . I_{DIODE}$	$R_{DIODE} = \frac{\eta V_T}{I_{DIODE}}$
Polarisation inverse	$C_{JONCTION} = \frac{C_{J0}}{\left(1 - \frac{V}{V_0}\right)^M}$	$C_{DIFFUSION} = 0$	$R_{DIODE} = +\infty$

♣ PETIT FORMULAIRE SUR LES POINTS IMPORTANTS

♣ Modèle équivalent de la diode :



La résistance R_S vaut au plus quelques ohms. ELLE EST SOUVENT NEGLIGEE.

	Polarisation directe	Polarisation inverse
I_{DIODE}	$I = I_{SATURATION} \left[\exp\left\{\frac{V}{\eta.V_T}\right\} - 1 \right]$ <p>Or $\exp\left\{\frac{V}{\eta.V_T}\right\} \gg 1$</p> <p>Donc $I = I_{SATURATION} \cdot \exp\left\{\frac{V}{\eta.V_T}\right\}$</p>	$I = I_{SATURATION} \left[\exp\left\{\frac{V}{\eta.V_T}\right\} - 1 \right] \text{ or } \exp\left\{\frac{V}{\eta.V_T}\right\} \rightarrow 0$ <p>Donc $I_{DIODE} = -I_{SATURATION} = 10^{-15} A$</p>
R_{DIODE}	<p>En courant alternatif, le générateur de courant est remplacé par la résistance :</p> $R_{DIODE} = \frac{\eta.V_T}{I_{DIODE}}$	<p>Le courant ne passe pas (ou très peu), donc :</p> $R_{DIODE} \rightarrow +\infty$
$C_{DIFFUSION}$	$C_{DIFFUSION} = \frac{\tau_{FORWARD}}{\eta.V_T} \cdot I_{DIODE}$	$C_{DIFFUSION} = 0$
$C_{JONCTION}$	$C_{JONCTION} \approx 2.C_{J0}$	$C_{JONCTION} = \frac{C_{J0}}{\left(1 - \frac{V}{V_0}\right)^M}$

♣ Les sept paramètres SPICE :

	Signification	Valeur ou expression
I_S	Courant inverse de saturation	$I_S = 10^{-15} A$
η	Coefficient d'émission	Empirique, immesurable $1 < \eta < 2$
R_S	Résistance ohmique de la jonction	R_S est négligeable
V_0	Barrière interne de potentiel	$V_0 = V_{THERMIQUE} \cdot \ln\left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}\right)$
C_{J0}	Capacité de jonction à polarisation nulle	$C_{J0} \approx$ qqes pF
m	Paramètre de jonction	Dépend de la façon de doper : 1/2 : bombardement ionique 1/3 : diffusion, ou croissance epitaxiale
Γ_F	Temps de transit	$\tau_{FORWARD} = \frac{C_{DIFFUSION}}{I_{DIODE}} \cdot \eta.V_T$

♣ Variation du courant I_{DIODE} en fonction de la tension V_{DIODE} :

