

Résumé de cours M1 Microélectronique
Module : Techniques de caractérisation des dispositifs semiconducteurs
1^{ère} Partie Caractérisation Electrique

Prof. Abdelhamid BENHAYA

Directeur du Laboratoire d'Electronique Avancée
Responsable Salle Blanche

Département d'Electronique <https://youtu.be/GkvcOFUuZuM>
Faculté de Technologie
Université Batna 2

Domaines d'intérêt:

Technologie des semi-conducteurs
(Matériaux et dispositifs photovoltaïques)

e-mail: a.benhaya@univ-batna2.dz
benhaya_abdelhamid@yahoo.fr

Tel: +213 (0)7 73 87 37 84



BIBLIOGRAPHIE

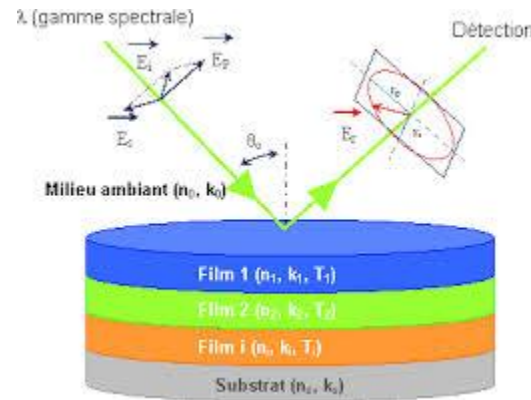
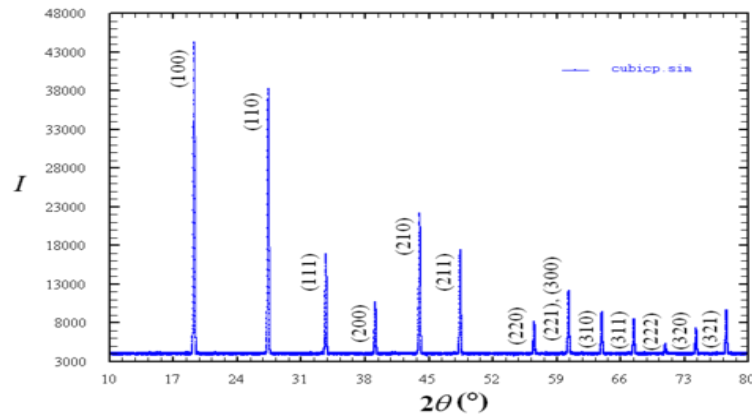
Langue Anglaise

1. DIETER K. SCHRODER, Semiconductor Material and Device characterization, John Wiley & sons, 2006.
2. P. BLOOD and J.W. ORTON, The Electrical Characterization of Semiconductors: Majority Carriers and Electron States, Academic Press, 1992.
3. M. Jamal Deen and Fabien, S. Kasap, P. Capper (Eds.), PascalSpringer Handbook of Electronic and Photonic Materials, DOI 10.1007/978-3-319-48933-9_20.

Langue Française

1. A. Vapaille et R. Castagné, Dispositifs et circuits semi-conducteurs, Physique et technologie (chapitre XII), dunod, 1987.
2. J. Boussey, Cours "Techniques de caractérisation électrique en technologie semi-conducteur (matériaux et dispositifs)", CDTA; Alger, Mai 2005.





1^{ère} partie

Techniques de Caractérisation Electrique

PLAN

Notions générales sur les Rayonnements

Grandes familles des techniques de caractérisation

Méthodes électriques

Quelques notions de base

Caractérisation du matériau

Mesure de la résistivité et de la résistance carrée

Technique des 2 pointes

Technique des 4 pointes

Technique de Van der Pauw

Technique basée sur l'effet Hall

Technique basée sur la mesure de la résistance de constriction

Caractérisation du dispositif

Technique de la jonction pn

Exploitation de la caractéristique $I(V)$

Exploitation de la caractéristique $C(V)$

Technique de la diode Schottky

Exploitation de la caractéristique $C(V)$

Technique de la diode MIS

Généralités sur la structure MIS

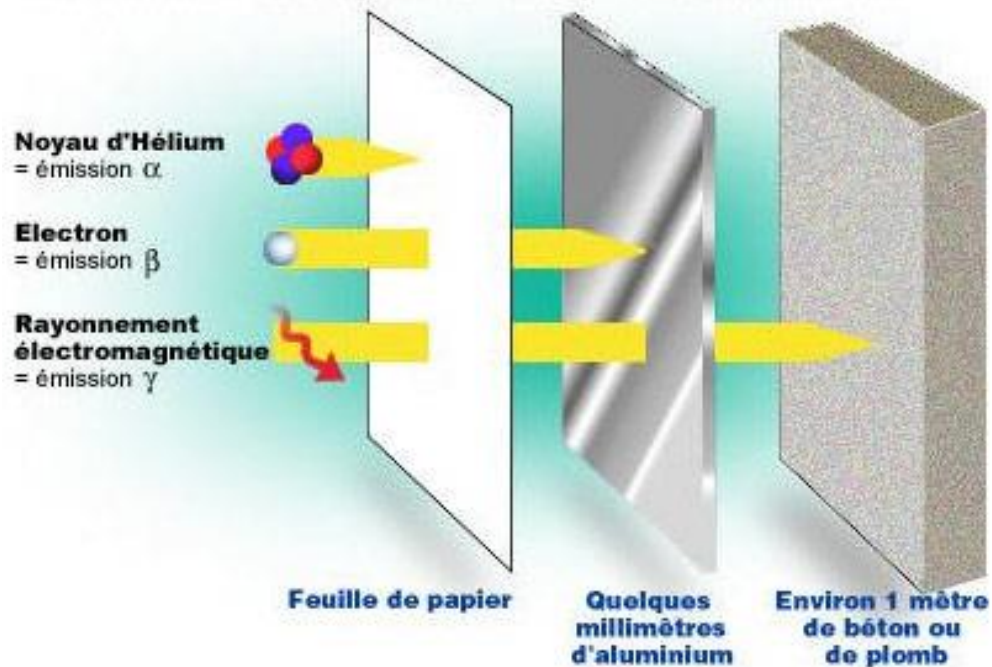
Structure MIS idéale

Structure MIS réelle

Exploitation de la caractéristique $C(V)$ réelle HF



Le pouvoir de pénétration des différents rayonnements



1-NOTIONS GÉNÉRALES SUR LES RAYONNEMENTS

COUCHES MINCES

TECHNIQUES DE CARACTÉRISATION

Nature des rayonnements

On peut distinguer deux types de rayonnements:

1. Rayonnements ondulatoires

- Ils ne s'accompagnent pas de transport de matière;
- Les rayonnements ondulatoires les plus fréquents sont les rayonnements électromagnétiques (champ électromagnétique sinusoïdal de fréquence ν ou de longueur d'onde λ se propageant dans le vide à la vitesse de la lumière c);
- Ils sont caractérisés par leur fréquence et leur vecteur d'onde;
- L'énergie de ce type de rayonnement est quantifiée $E=h\nu$.

Exemple: Rx, lumière, UV, IR,...etc.

2. Rayonnements corpusculaires

- Ils sont constitués par des corpuscules de masse m ayant:
 - une vitesse v , donc une énergie cinétique $E_c=(1/2)mv^2$;
 - une quantité de mouvement $P=mv$;
 - une longueur d'onde donnée par la relation de De Broglie $\lambda=h/(mv)$.

Exemple: Electrons, protons, neutrons, ions,...etc.



COUCHES MINCES

TECHNIQUES DE CARACTÉRISATION

Classification des rayonnements suivant leur énergie

- **1. Rayonnements de grande énergie:** Ces rayonnements, dont la limite inférieure de l'énergie est de l'ordre du MeV, agissent au niveau des noyaux atomiques en provoquant leur fission ou fusion (**Physique nucléaire**).
- **2. Rayonnements d'énergie moyenne:** Ces rayonnements, dont la limite inférieure de l'énergie est de l'ordre de la dizaine d'eV, agissent jusqu' au niveau des couches électroniques profondes les plus proches du noyau (couches L et K \Rightarrow **Domaine de l'analyse chimique**)
- **3. Rayonnements de faible énergie:** Ces rayonnements agissent sur les couches électroniques externes dont une partie assurent les liaisons entre les atomes. Ils apportent donc des informations sur l'état chimique de la matière (**Liaisons chimiques**).



COUCHES MINCES

TECHNIQUES DE CARACTÉRISATION

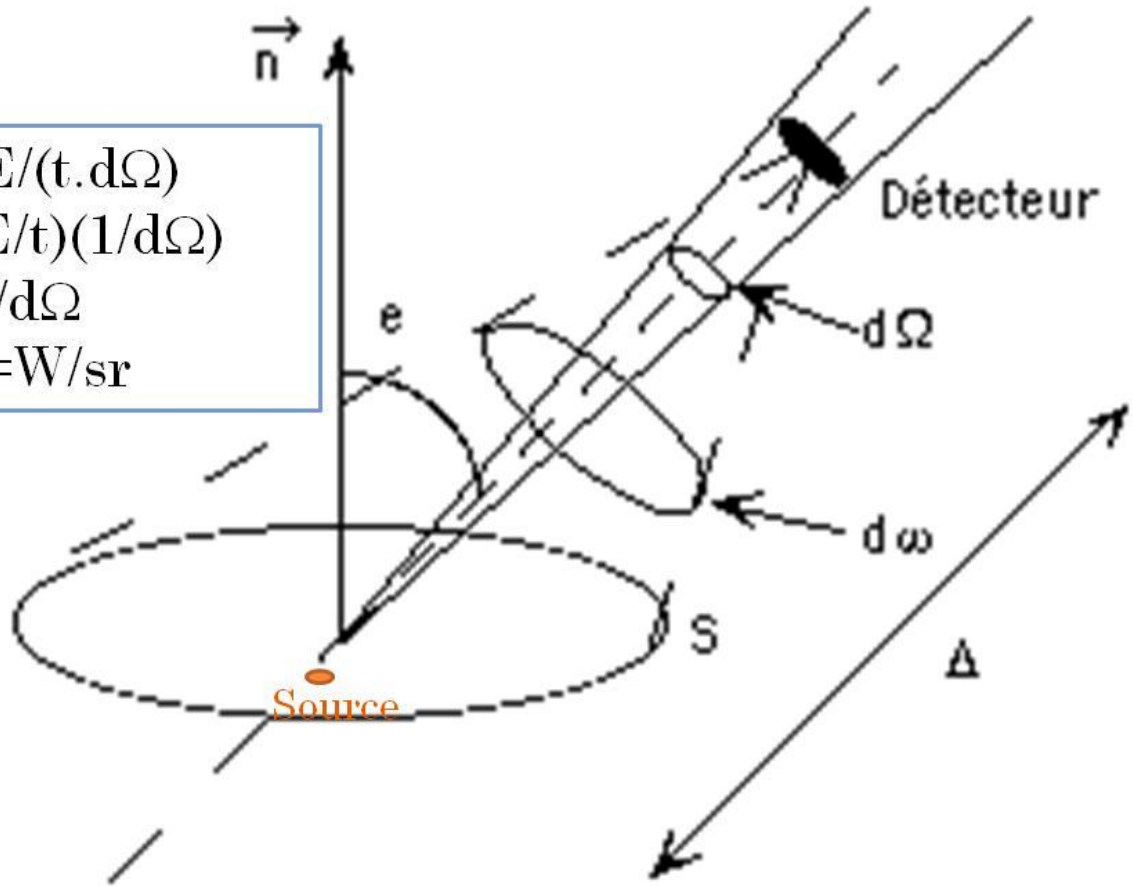
Grandeurs caractérisant un rayonnement

Les principales grandeurs physiques qui apparaissent dans l'étude des rayonnements sont:

- **1. Longueur d'onde λ :** Distance λ dont une onde sinusoïdal progresse pendant une période T ($\lambda=vT$ où v est la vitesse, $[\lambda]=$ mètre)
- **2. Fréquence ν :** C'est le nombre de périodes par seconde ($\nu=1/T$, $[\nu]=$ Hertz)
- **3. Energie E :** Propriété d'un système capable de fournir du travail ($[E]=$ Joule)
- **4. Intensité I :** L'intensité d'un rayonnement émis d'un point (la source supposée ponctuelle) est l'énergie traversant l'unité d'angle solide par unité de temps $[I]=$ Watt/stéradian



$$I = E / (t \cdot d\Omega)$$
$$= (E/t) (1/d\Omega)$$
$$= P / d\Omega$$
$$[I] = W / sr$$



COUCHES MINCES

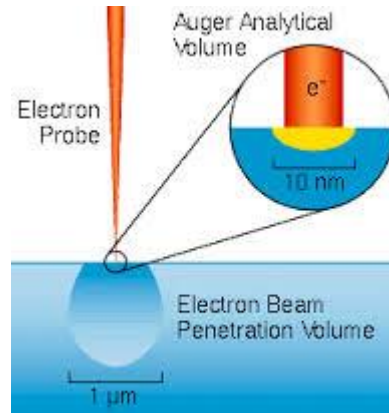
TECHNIQUES DE CARACTÉRISATION

Expressions pour une détermination rapide des longueurs d'onde

Rayonnement	Expression de la longueur d'onde
Rayonnement électromagnétique	$\lambda(\text{Å}) = \frac{12400}{E(\text{eV})}$
Rayonnement électronique V << c (sans correction relativiste) v ≈ c (avec correction relativiste)	$\lambda(\text{Å}) = \frac{12,26}{\sqrt{E(\text{eV})}}$ $\lambda(\text{Å}) = \frac{12,26}{\sqrt{Ec(1 + 0,979 \cdot 10^{-6} Ec(\text{eV}))}}$ Ec(eV)
Rayonnement neutronique	$\lambda(\text{Å}) = \frac{25,14}{\sqrt{T(\text{K})}}$



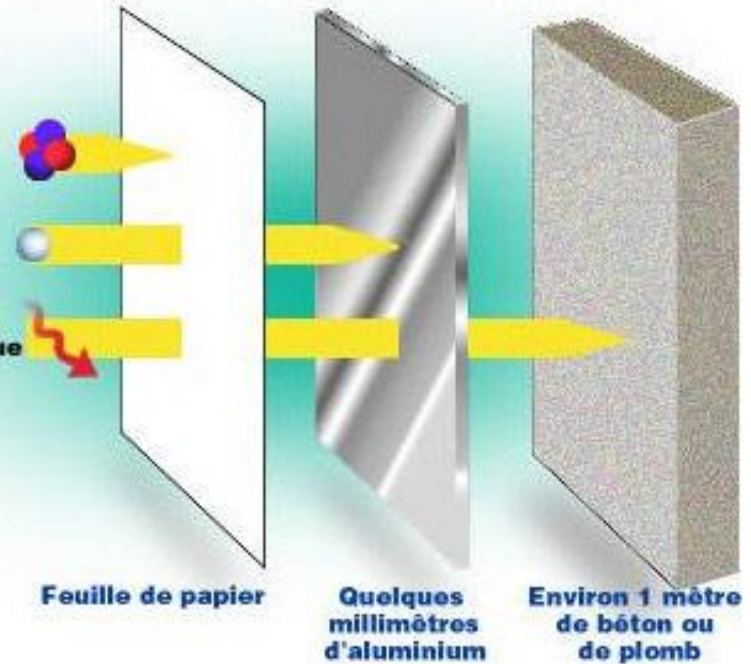
Le pouvoir de pénétration des différents rayonnements



Noyau d'Hélium
= émission α

Electron
= émission β

Rayonnement électromagnétique
= émission γ



2- EXEMPLES D'ÉQUIPEMENTS UTILISANT LES DEUX TYPES DE RAYONNEMENTS

COUCHES MINCES

TECHNIQUES DE CARACTÉRISATION

EXEMPLE: MEB (UTILISE UN FAISCEAU D'ÉLECTRONS)

The diagram illustrates the internal structure of a scanning electron microscope (SEM). Key components labeled include:

- Canon à électron (Electron gun)
- Faisceau d'électrons (Electron beam)
- Diaphragme (Diaphragm)
- Lentille électromagnétique (Electromagnetic lens)
- Bobines de déflexion (Deflection coils)
- Lentille électromagnétique (Electromagnetic lens)
- Détecteur d'électrons rétrodiffusés (Secondary electron detector)
- Echantillon (Sample)
- Capteur d'électrons secondaires (Secondary electron detector)
- Vers la pompe à vide (Towards the vacuum pump)
- Générateur de haute tension (High voltage generator)
- Générateur de balayage (Scanning generator)
- Spectromètre X (X-ray spectrometer)
- Amplificateur (Amplifier)
- Ecran cathodique (Cathode screen)

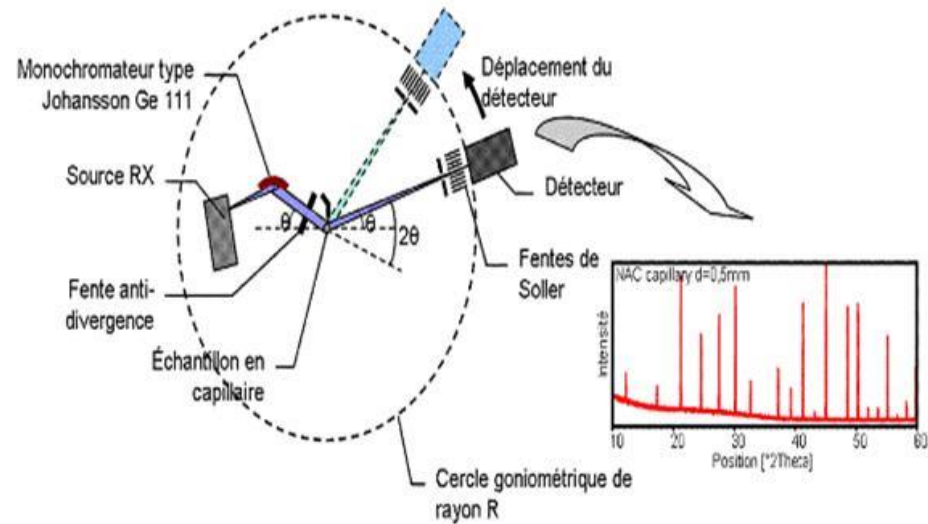
Le microscope électronique à balayage



COUCHES MINCES

TECHNIQUES DE CARACTÉRISATION

EXEMPLE: DRX (UTILISE UN FAISCEAU DE RX)

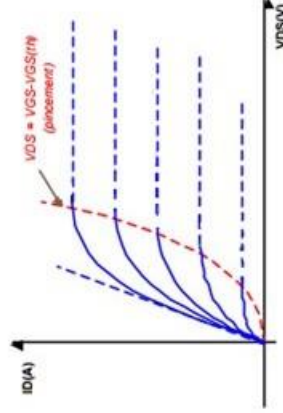




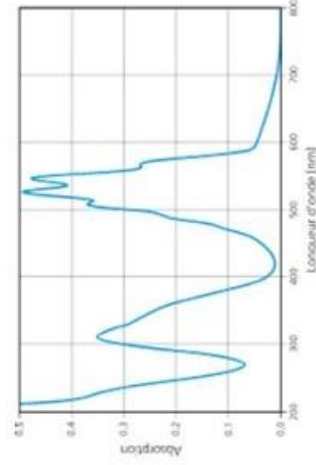
Cristallographique



Physicochimique



Electrique



Optique

Techniques de caractérisation des dispositifs semiconducteurs

1^{ère} Partie Caractérisation Electrique

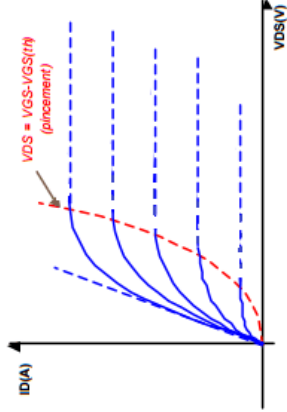




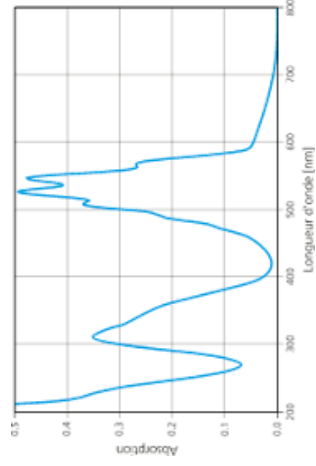
Cristallographique



Physicochimique



Electrique



Optique



3-GRANDES FAMILLES DE CARACTÉRISATION

COUCHES MINCES

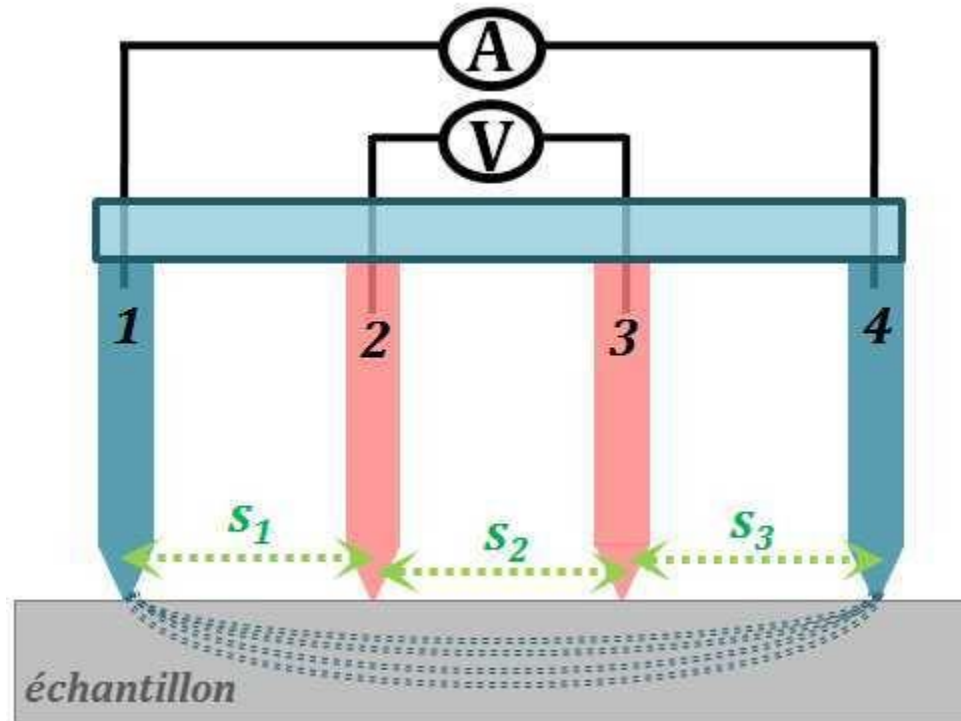
TECHNIQUES DE CARACTÉRISATION

Les quatre familles des méthodes de caractérisation

Les différentes méthodes de caractérisation utilisées peuvent être rangées sous quatre rubriques à savoir:

1. Méthodes cristallographiques
Orientation cristalline, Qualité cristalline, phases,...
2. Méthodes physicochimiques;
Dosage impuretés, mode de liaison,...
3. Méthodes électriques
Résistivité, mobilité,...
4. Méthodes optiques
Constantes optiques, niveaux impuretés,...

4-MÉTHODES ÉLECTRIQUES



4.1.: Quelques notions de base



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

NOTIONS DE BASE

Ordre de grandeur

Matériaux →			
Grandeur ↓	Métaux	Semi-conducteurs	Isolants
Résistivité ($\Omega \cdot m$)	$5 \cdot 10^{-8}$ à $2 \cdot 10^{-6}$	10^{-3} à 10^4	$> 10^8$
Conductivité ($\Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$)	$5 \cdot 10^5$ à $2 \cdot 10^7$	10^{-4} à 10^3	$< 10^{-8}$
Concentration (cm^{-3})	10^{22} à 10^{23}	10^{13} à 10^{19}	-

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p)$$

$$\rho = 1/\sigma = 1/e(n\mu_n + p\mu_p)$$

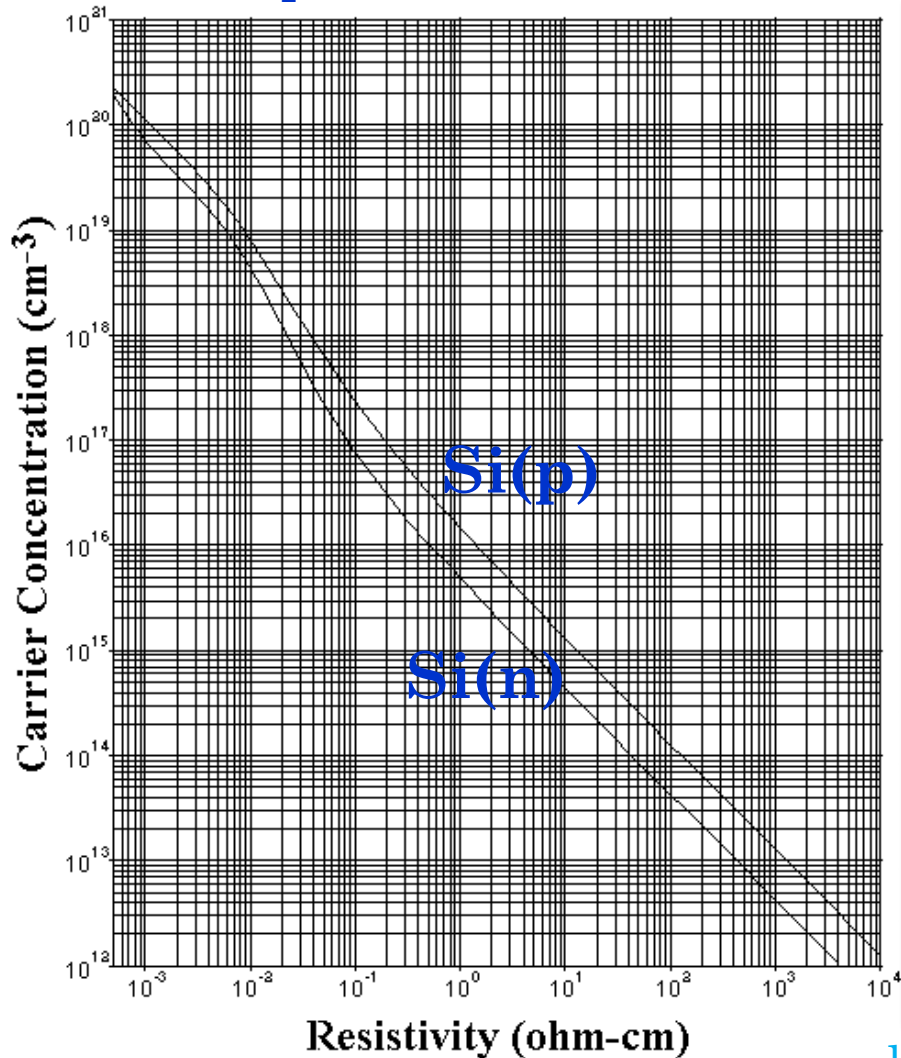
$$\sigma \approx en\mu_n \quad \text{S/C type n}$$

$$\sigma \approx ep\mu_p \quad \text{S/C type p}$$

MÉTHODES ÉLECTRIQUES

NOTIONS DE BASE

Abaque d'Irwin



Nom du métal	Résistivité à 300 K (Ω·m)
<u>Argent</u> ¹	16 × 10 ⁻⁹
<u>Cuivre</u> ¹	17 × 10 ⁻⁹
<u>Or</u> ¹	22 × 10 ⁻⁹
<u>Aluminium</u> ¹	28 × 10 ⁻⁹
<u>Magnésium</u> ¹	43 × 10 ⁻⁹
<u>Bronze</u>	55 × 10 ⁻⁹
<u>Zinc</u> ¹	61 × 10 ⁻⁹
<u>Laiton</u> ¹	71 × 10 ⁻⁹
<u>Cadmium</u> ¹	76 × 10 ⁻⁹
<u>Nickel</u> ¹	87 × 10 ⁻⁹
<u>Fer</u> ¹	100 × 10 ⁻⁹
<u>Platine</u> ¹	111 × 10 ⁻⁹
<u>Étain</u> ¹	120 × 10 ⁻⁹
<u>Plomb</u> ¹	208 × 10 ⁻⁹
<u>Constantan</u>	500 × 10 ⁻⁹
<u>Mercure</u> ¹	941 × 10 ⁻⁹
<u>Nichrome</u>	1 000 × 10 ⁻⁹

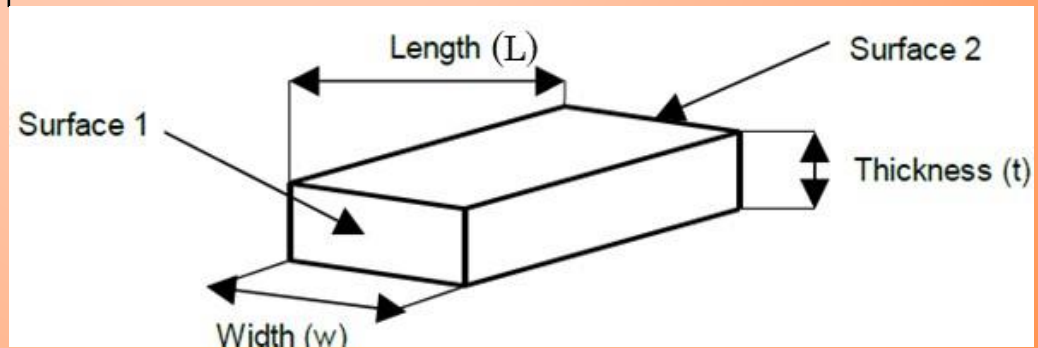
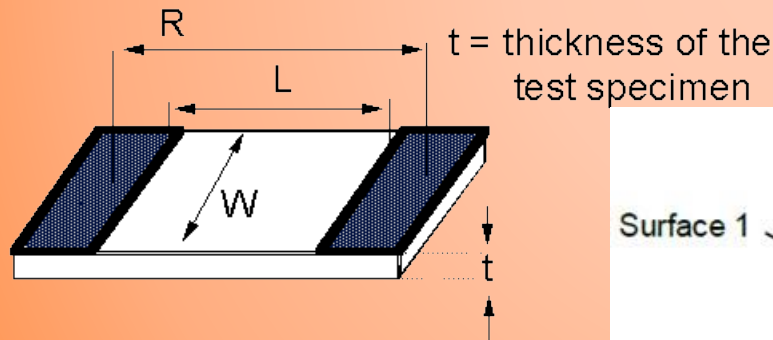
MÉTHODES ÉLECTRIQUES

NOTIONS DE BASE

Resistance carrée (Sheet resistance)

C'est la résistance qu'on mesure entre 2 électrodes larges de 1 cm (**W= 1cm**) et distantes de 1 cm (**L=1cm**)

$$R = \rho \frac{L}{S} = \rho \frac{L}{W \cdot t} = \rho \frac{L}{L \cdot t} \text{ (si } W = L, \text{ carré)} = \frac{\rho}{t} = R_{\square}$$



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

NOTIONS DE BASE

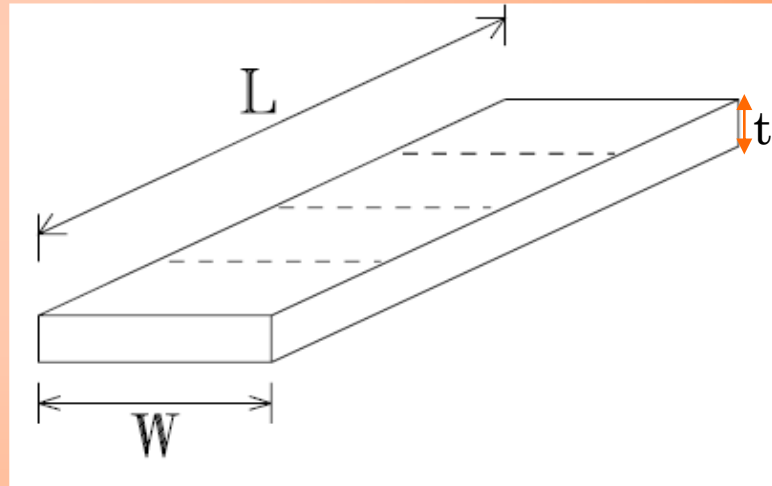
Relation avec le dessin de masques

Résistance d'une piste conductrice de longueur L et de largeur W est donnée par:

$$R = \rho \frac{L}{S} = \rho \frac{L}{W \cdot t} = \rho \frac{L}{L \cdot t} \text{ (si } W = L, \text{ carré)} = \frac{\rho}{t} = R_{\square}$$

- L et W caractérisent le **dessin des masques**;
- R_{\square} caractérise **la technologie**.

Le **rapport L/W** peut être considéré comme un **“nombre de carrés**, d'où l'appellation de R_{\square} **“résistance par carré”**.



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

NOTIONS DE BASE

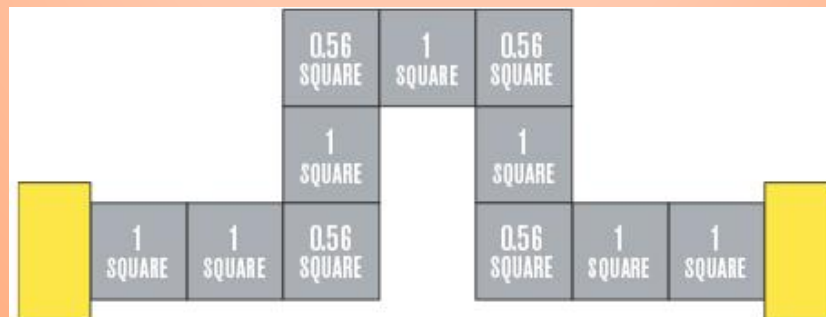
Calcul de la résistance d'un ruban

$$R = R_{\square} (L/W)$$



Cas d'une configuration serpentine

Cette configuration est généralement utilisée pour **les résistances de valeur élevée**. Le **nombre de coins complique le calcul** de la valeur. La **résistance «carrée» dans les coins** d'une résistance de **type serpentin** doit être **comptée à 0,56** de la valeur de la résistance carrée.



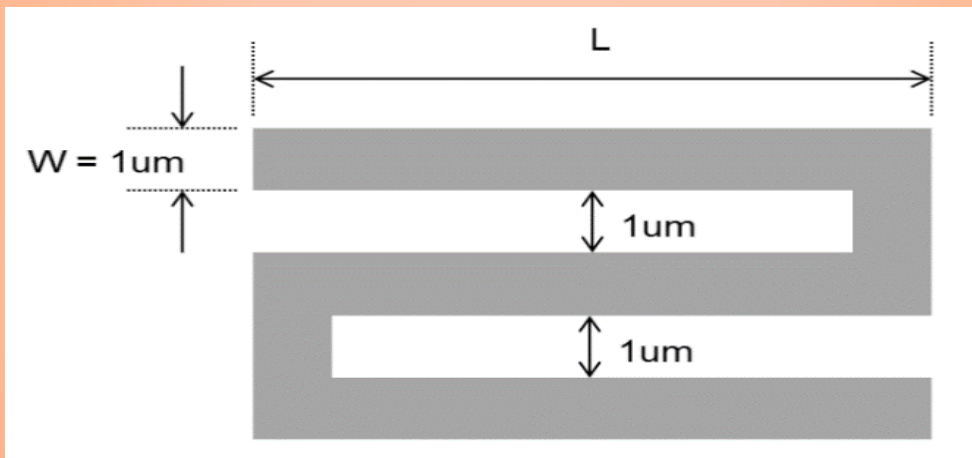
MÉTHODES ÉLECTRIQUES

NOTIONS DE BASE

Exemple

La configuration suivante a une résistance totale $R=22 \Omega$ et une résistance carrée $R_{\square}=0,5 \Omega/\square$.

Calculer la longueur L .



$$R=2\left(\frac{L-W}{W}\right) R_{\square} + \frac{(L-2W)}{W} R_{\square} + 2 R_{\square} + (4 \cdot 0,56 \cdot R_{\square}) \Rightarrow$$
$$L/W=14,58 \Rightarrow L=14,58 \mu\text{m} \approx 15 \mu\text{m}$$

4-MÉTHODES ÉLECTRIQUES

4.2.: Caractérisation du matériau

**Mesure de la résistivité
et
de la résistance carrée**



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

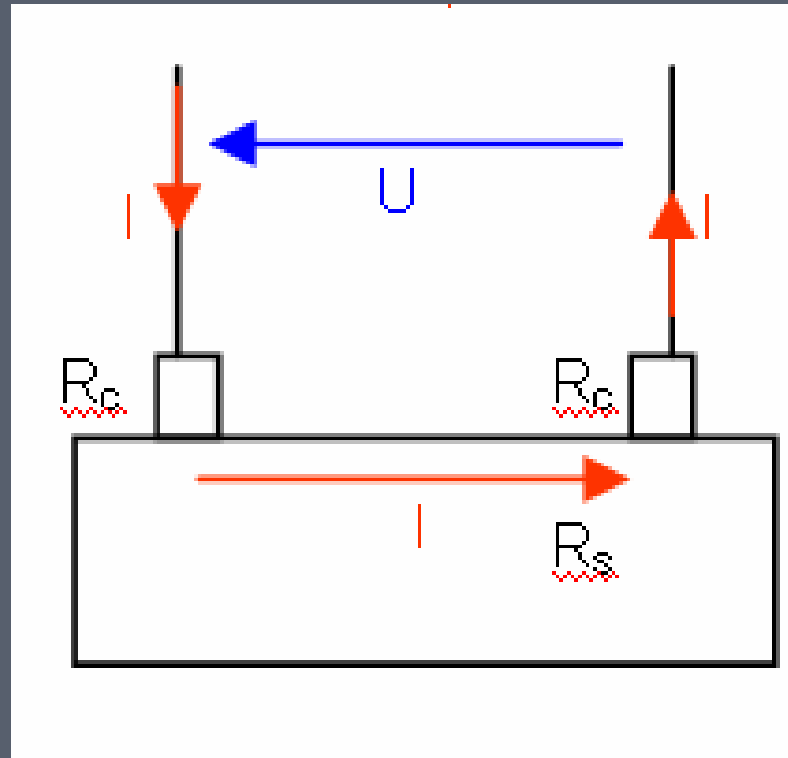
TECHNIQUES DES 2 ET 4 POINTES

Techniques de mesure de la résistivité et la résistance carrée

Il existe 3 principales méthodes:

- **Technique des 2 pointes;**
- **Technique des 4 pointes colinéaires (Technique de Kelvin);**
- **Technique de Van der Pauw.**





4.2.1: Technique des 2 pointes

MÉTHODES ÉLECTRIQUES

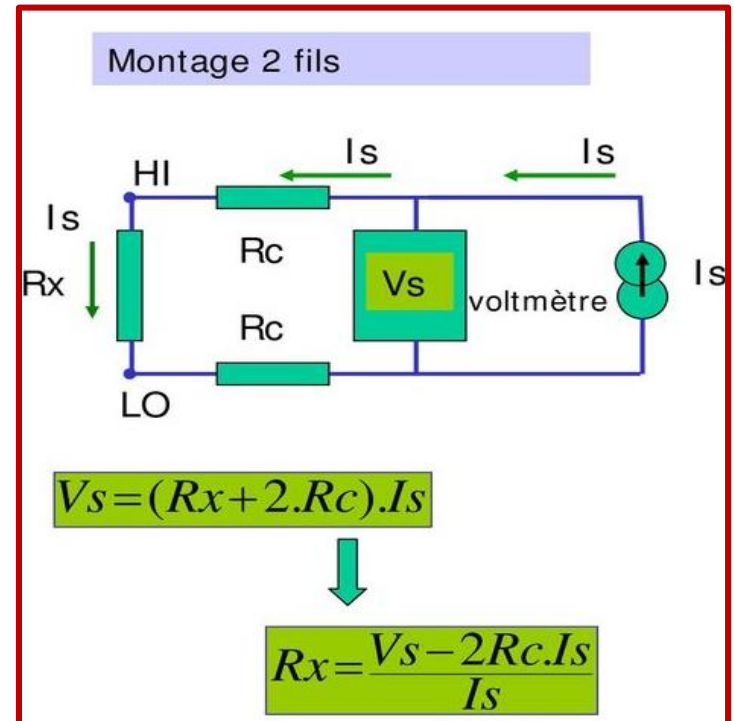
TECHNIQUE 2 POINTES

Technique des 2 pointes

$R = R_{\text{résistance du matériau}} (R_x) + \text{résistance des contacts} (2R_c)$

$$R = V/I = R_x + 2 R_c$$

Cette méthode peut être utilisée pour les **grandes résistances**, car les **résistances de contact** et de **spreading** sont **négligeables**.



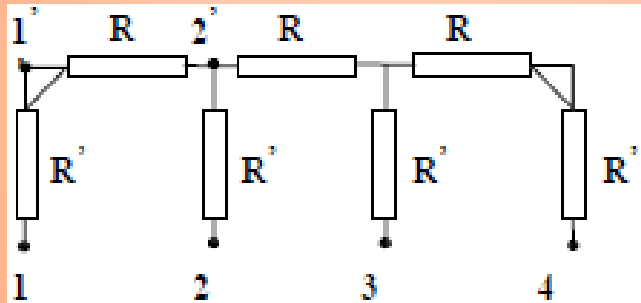
MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUES DES 2 POINTES

Technique des 2 pointes (suite)

Comment accéder à la résistance du matériau et celles des contacts?

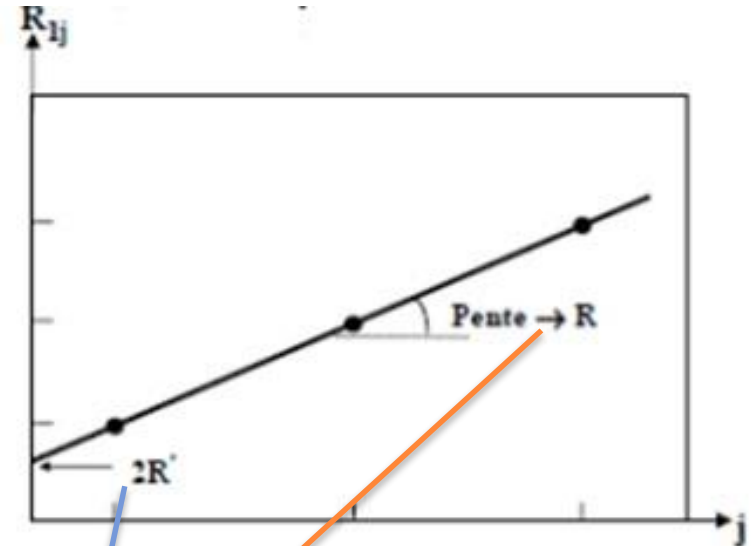
On effectue les mesures entre les bornes 1-2, 1-3, 1-4, etc, et on représente $R_{1j}=f(j)$



$$1-2 : R_{12} = R + 2R'$$

$$1-3 : R_{13} = 2R + 2R'$$

$$1-4 : R_{14} = 3R + 2R'$$

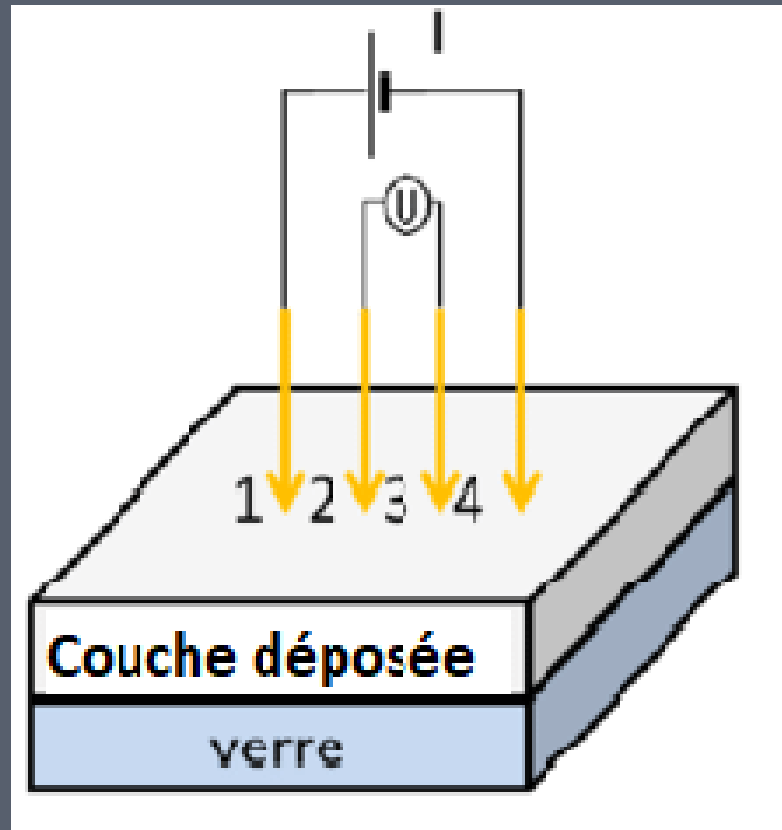


R' la résistance de contact

R la résistance due au matériau

$$Y = ax + b$$

$$R_{1-j} = R \cdot j + 2R'$$



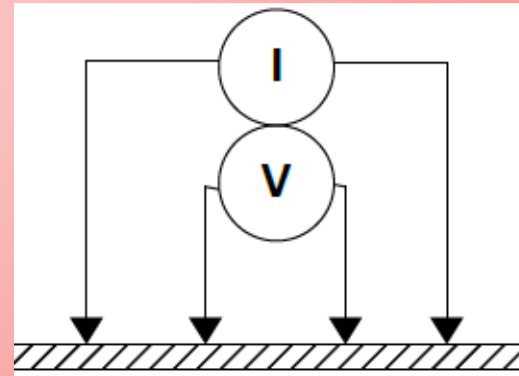
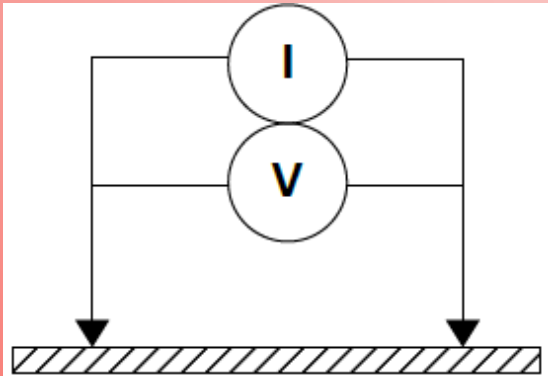
4.2.2: Technique des 4 pointes

MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUES 2 ET 4 POINTES

Différence entre les techniques 2 pointes et 4 pointes

- Avec la **Technique à 2 points**, le **courant** et la **tension** sont mesurés **dans les mêmes fils**. Donc, la **tension mesurée** est ajoutée avec la différence de potentiel **créée dans les fils**.
- Pour une **haute résistivité** (à partir de $1\text{M } \Omega/\square$), cette méthode peut être utilisée, car les **résistances de contact** et de **spreading** sont **négligeables**.
- Pour les mesures de **faible résistivité**, cette méthode **ne sera pas précise**, car les résistances **de contact** et de **spreading** seront très proches de la résistance de l'échantillon.



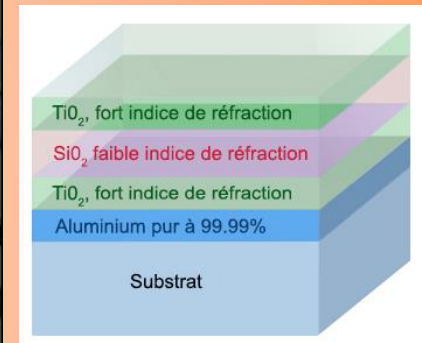
MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DES 4 POINTES

Technique des 4 pointes

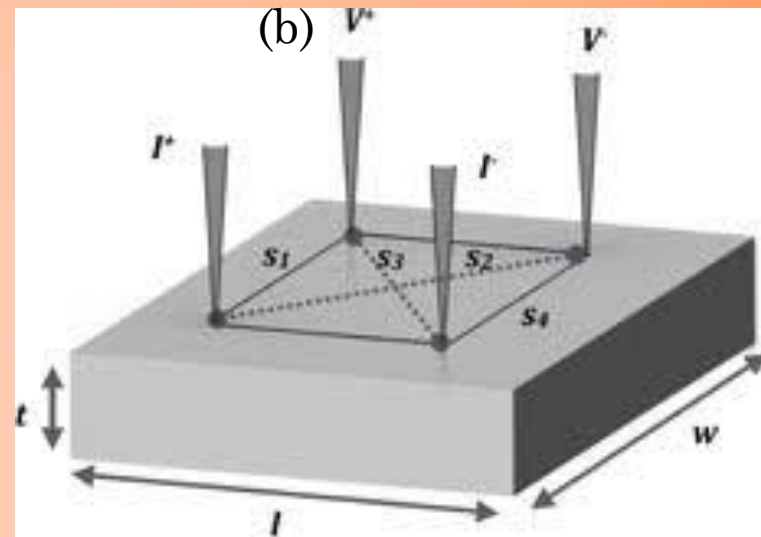
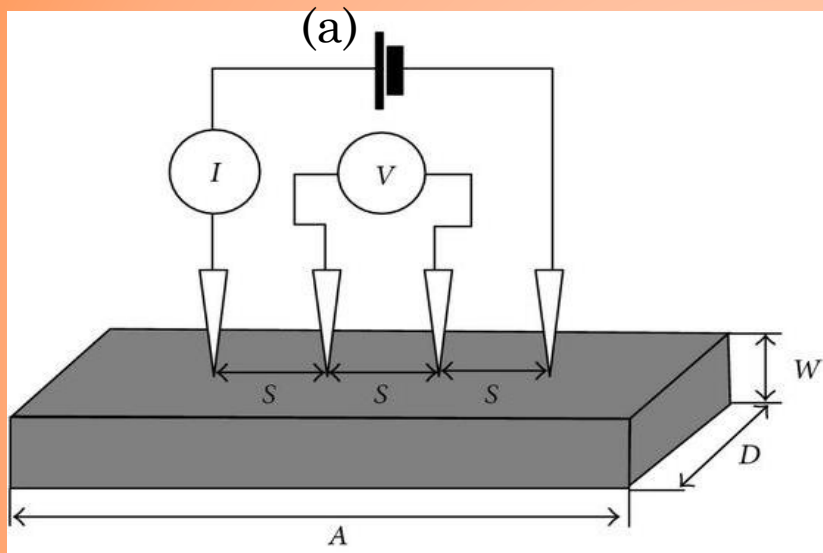
Les différents cas de mesures rencontrés sont:

- Lingot : avant découpe;
- Plaquettes;
- Couches minces déposée (dopées et/ ou épitaxiées)
sur un **substrat isolant** ou isolées par **jonction**.



MÉTHODES ÉLECTRIQUES TECHNIQUES 2 ET 4 POINTES

Les deux configurations de la sonde 4 pointes



4 pointes métalliques **alignées (a)** ou disposées en **carré (b)**
(à une distance entre 0,5 et 1,5 mm).

N.B.: s **diminue** avec la résistance. Elle est de **1.59 mm**
pour **les matériaux faiblement conducteur** (ex :Si) et de
1mm pour **les métaux**.

MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE 4 POINTES

Avantage des 4 pointes par rapport aux 2 pointes

Avec les 4 points, le courant est imposé par les pointes "externes" et est donc indépendant des résistances de contact entre les pointes et l'objet.

Avec les pointes "internes" on mesure une tension pratiquement sans faire passer du courant dans les pointes.

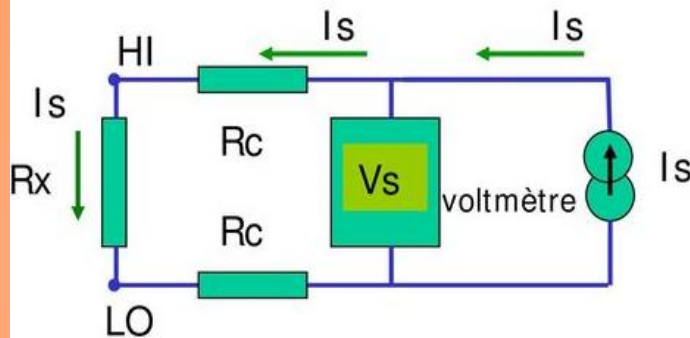
Donc, on est insensible à la résistance de contact.



MÉTHODES ÉLECTRIQUES TECHNIQUES 4POINTS

Comparaison: 2points-4 points

Montage 2 fils

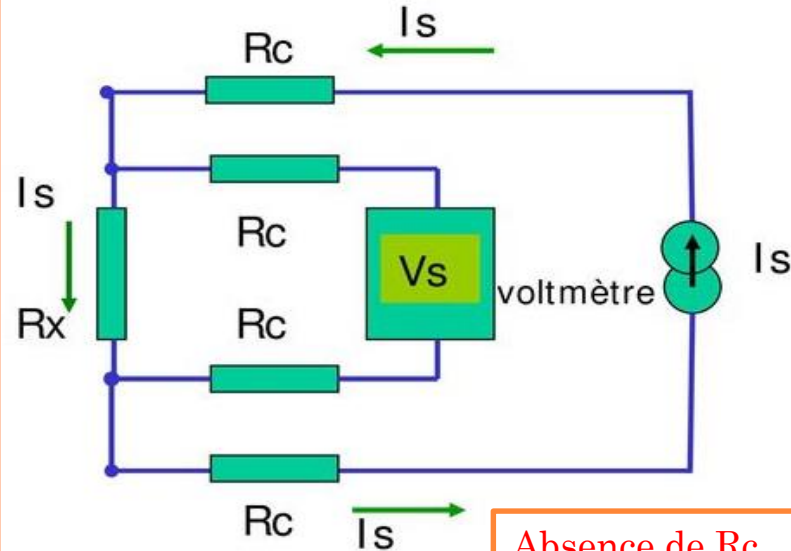


$$V_s = (R_x + 2 \cdot R_c) \cdot I_s$$

Présence
de R_c

$$R_x = \frac{V_s - 2R_c \cdot I_s}{I_s}$$

Montage 4 fils



$$V_s = R_x \cdot I_s$$

Absence de R_c

$$R_x = \frac{V_s}{I_s}$$



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

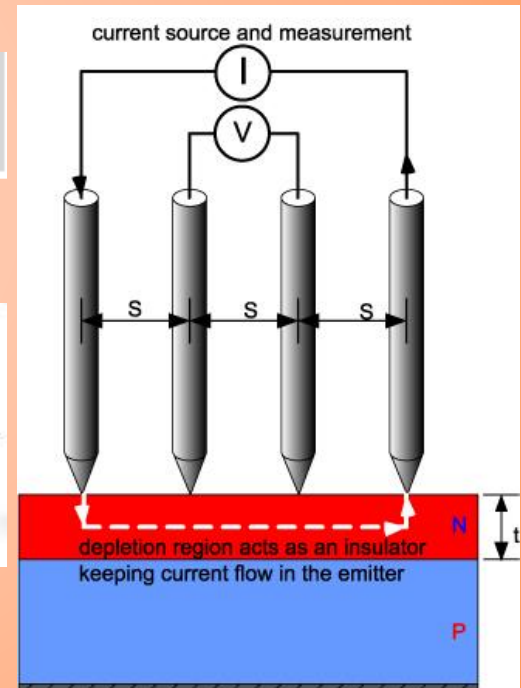
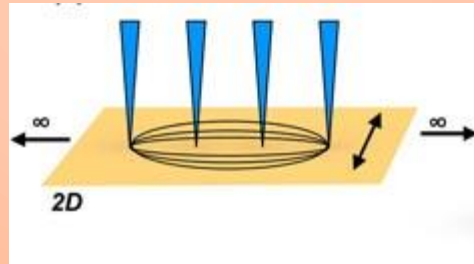
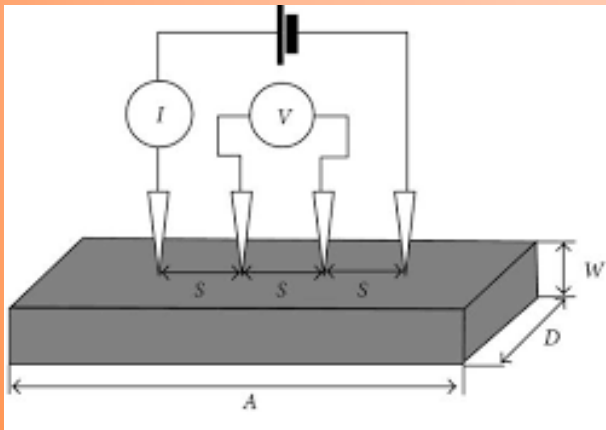
TECHNIQUE 4 POINTES

Échantillon en tranche (ou couche isolée du substrat) d'épaisseur $w \ll s$ (épaisseur finie)

N.B.: L'épaisseur de la couche est supposée connue (profilométrie, par interférométrie ou par microscopie à balayage).

$$\rho = \frac{\pi w}{\ln 2} \frac{|\Delta V|}{I} \Rightarrow \rho = 4,53w \frac{|\Delta V|}{I}$$

$$R_{\text{carrée}} = \frac{\rho}{w} = 4,53 \frac{|\Delta V|}{I}$$



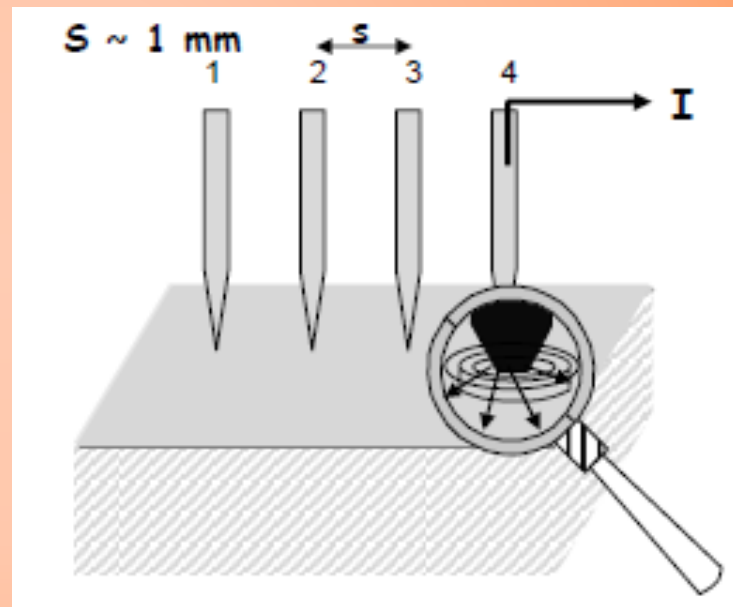
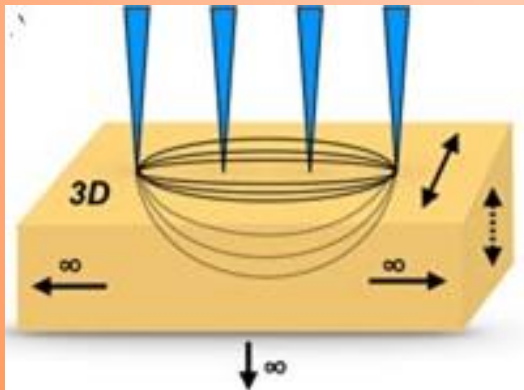
MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE 4 POINTES

Échantillon semi infini

L'échantillon est supposé fini selon une des dimensions latérales mais a une épaisseur infini.

$$\rho = 2\pi s \frac{|\Delta V|}{I}$$



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE 4 POINTES

Échantillons réels (géométries finies)

$$\rho = 2\pi s \frac{|\Delta V|}{I} \longrightarrow \rho = F_1 F_2 F_3 \left(2\pi s \frac{|\Delta V|}{I} \right) \quad (\Omega \text{ cm})$$

F_1 : épaisseur finie

F_2 : Dimensions latérales finies

F_3 : Proximité des pointes aux bords de l'échantillon

Pointes en ligne
et équidistantes



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE 4 POINTES

Facteurs de correction

F₁ : épaisseur finie w/s

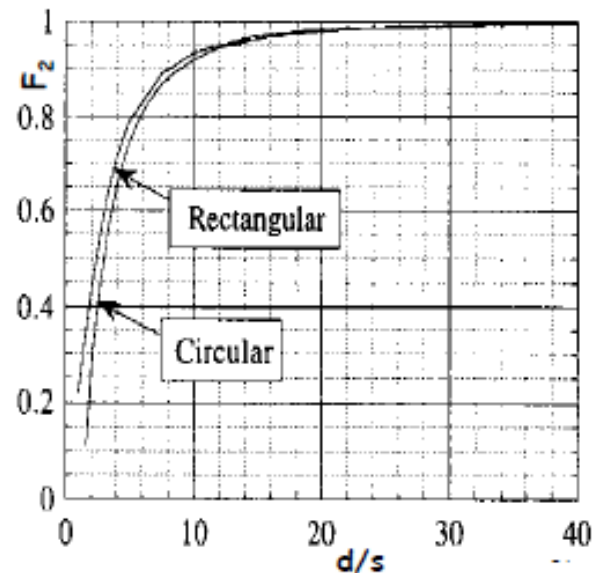
$$F_1 = \frac{w/s}{2 \ln \left\{ \frac{\sinh(w/s)}{\sinh(w/2s)} \right\}} \xrightarrow{w \leq \frac{s}{2}} F_1 = \frac{w/s}{2 \ln 2} \Rightarrow \rho = 4,53 F_2 F_3 \left(\frac{|\Delta V|}{I} \right) w$$

J. Albers, H.L. Berkowitz, *J. Electrochem. Soc.* **132**, 2453-2456, (1985)

F₂ : Dimensions latérales finies.

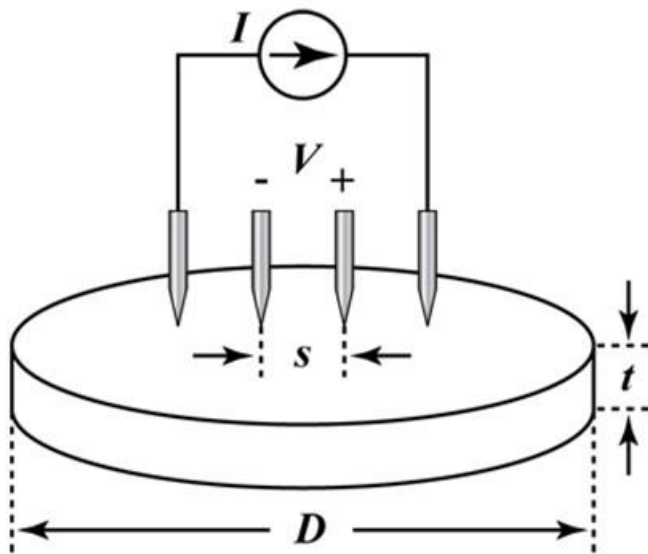
Pour un échantillon circulaire de diamètre d ou rectangulaire de largeur d

$$F_2 = \frac{\ln 2}{\ln 2 + \ln \left\{ \frac{(d/s)^2 + 3}{(d/s)^2 - 3} \right\}}$$



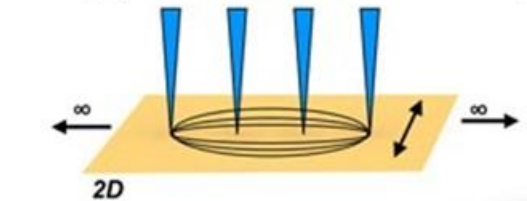
MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE 4 POINTES



$$\rho_{\square} (\Omega/\square) = \frac{\pi}{\ln(2)} \left(\frac{V}{I}\right)$$

$$\rho (\Omega \cdot \text{cm}) = \frac{\pi}{\ln(2)} t \left(\frac{V}{I}\right)$$

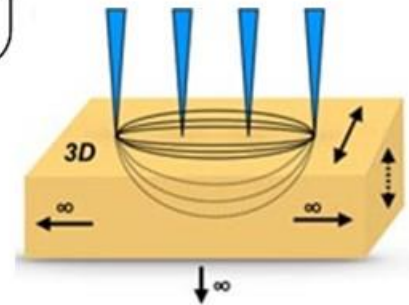


$t \ll s$ and $s \ll D$

$$\rho_{\square} (\Omega/\square) = C \frac{\pi}{\ln(2)} \left(\frac{V}{I}\right)$$

$$\rho (\Omega \cdot \text{cm}) = C \left(\frac{V}{I}\right) \frac{(\pi t)}{\ln\left(\frac{\sinh(t/s)}{\sinh(t/2s)}\right)}$$

otherwise



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE 4 POINTES

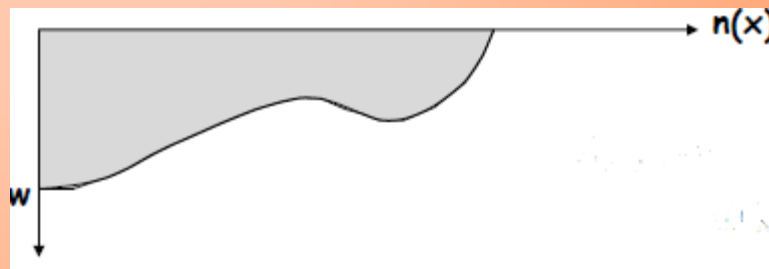
Cas d'une couche non uniformément dopée

Dans ce cas, on procède comme suit:

$$R_{\text{carrée}} = \frac{1}{w\sigma} = \frac{1}{w \frac{1}{w} \int_0^w \sigma(x) dx} = \frac{1}{q \int_0^w [n(x)\mu_n(x) + p(x)\mu_p(x)] dx}$$

Si la mobilité est supposée constante, et le dopage uniquement de type n, on aura:

$$R_{\text{carrée}} = \frac{1}{q\mu_n \int_0^w n(x) dx}$$

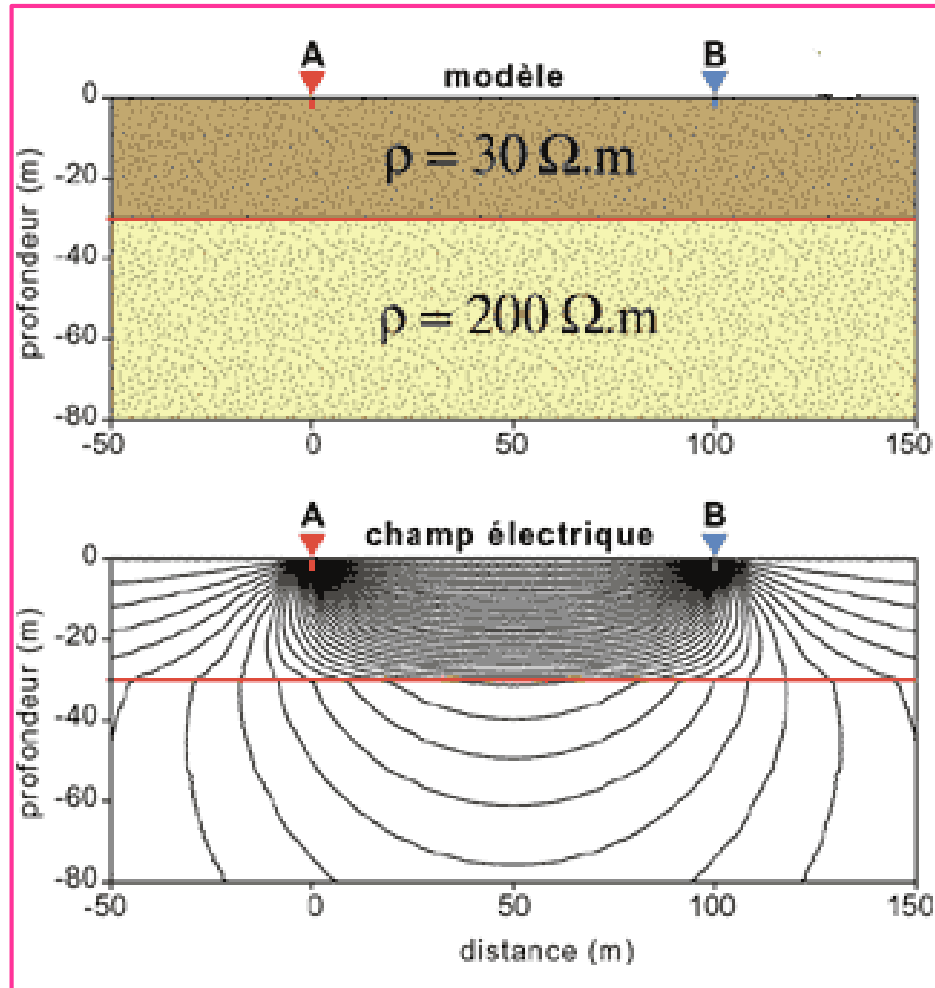


MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE 4 POINTES

Remarque: Répartition du courant

On constate que le courant se concentre dans la 1^{ère} couche en haut ayant une faible résistivité.



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE 4 POINTES

Avantages de la technique des 4 pointes

- Rapide et facile à mettre en œuvre;
- Cartographier une tranche (appareils automatique pour faire le mapping sur une tranche);
- Appareils électriques élémentaires (source de courant, ampèremètre et voltmètre);

Inconvénients et limitations

- Les pointes peuvent endommager la surface;
- Très forte dépendance de la géométrie et de l'épaisseur de l'échantillon;
- Nécessite des surfaces relativement grandes;
- Dépendante de l'état de la surface explorée.

Conclusion

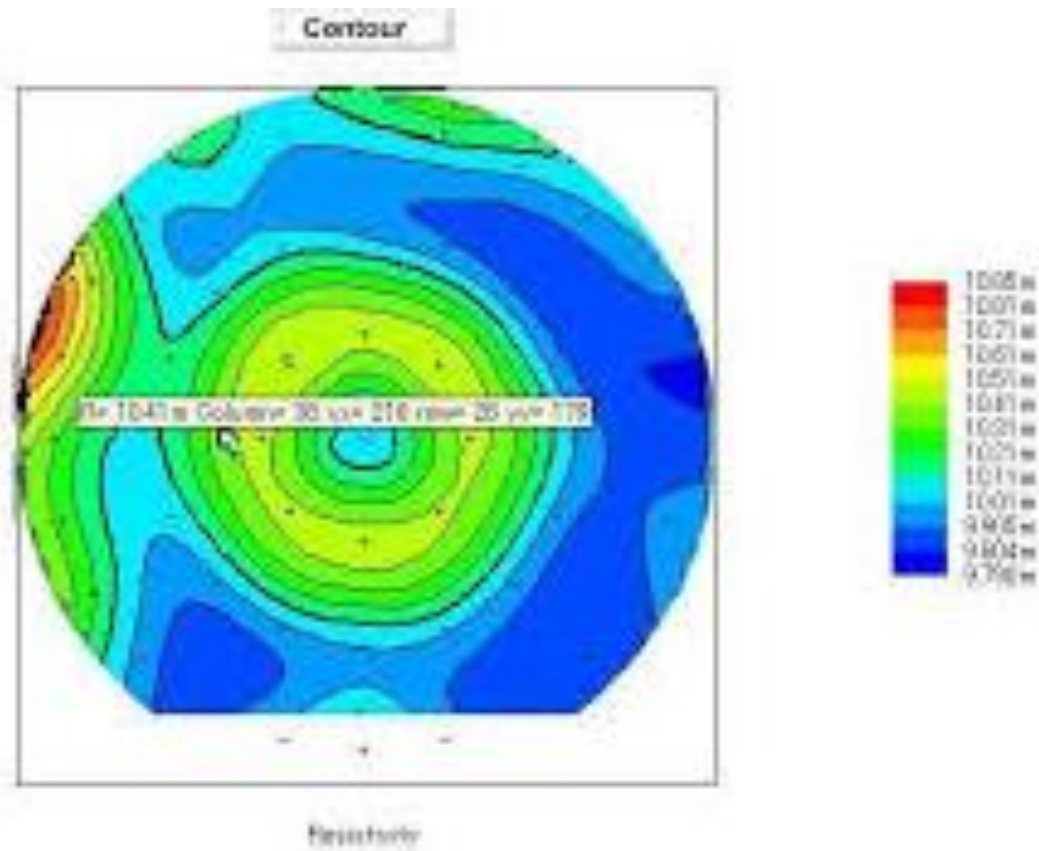
Elle donne seulement une estimation de la valeur moyenne de la résistivité.



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE 4 POINTES

Mapping

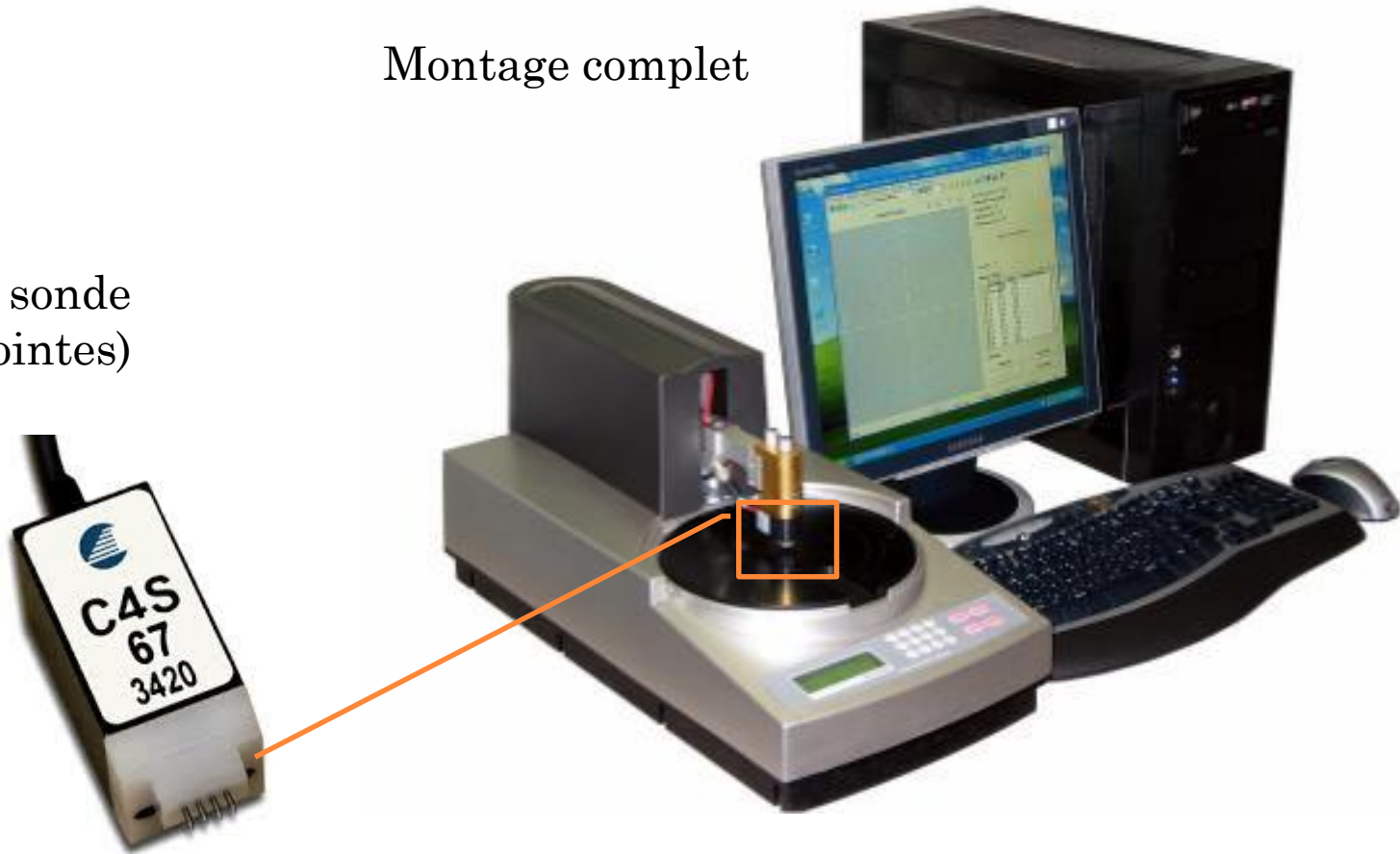


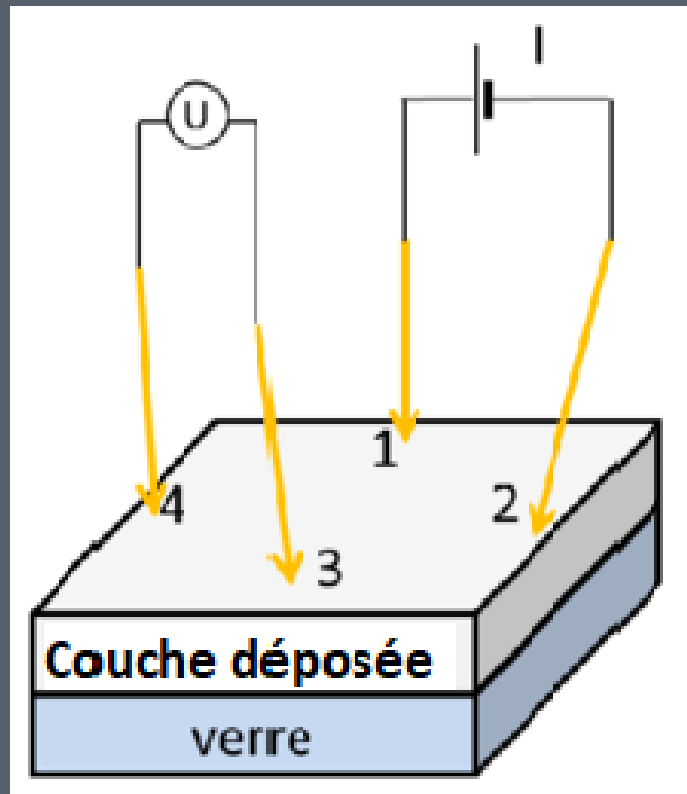
MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE 4 POINTES

Montage complet

La sonde
(4 pointes)





4.2.3: Technique de Van der Pauw

MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE VAN DER PAUW

Base de la technique de Van der Pauw

La méthode des 4 pointes reste-t-elle valable même si les pointes ne sont pas alignées?

Sous **certaines conditions**, la résistivité de **n'importe quelle échantillon plat** peut être mesurée **même si on ne connaît pas la configuration exacte des lignes de courant**.

Conséquence

La **méthode de Van der Pauw** peut être considérée **comme une généralisation** de la **technique des 4 pointes**.

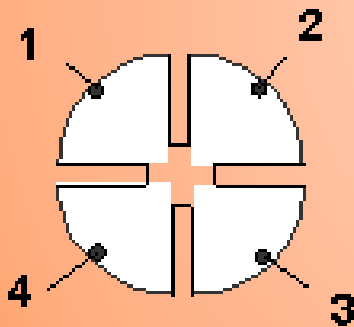


MÉTHODES ÉLECTRIQUES

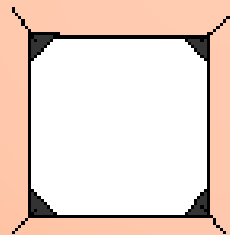
TECHNIQUE DE VAN DER PAUW

Conditions d'application de la technique de Van der Pauw

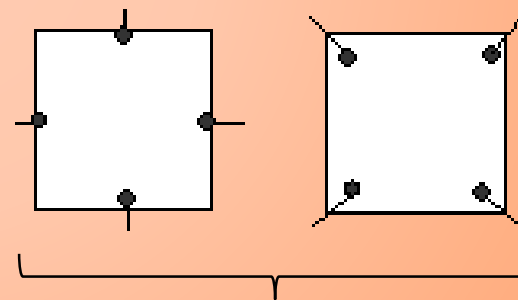
- **Positionnement** des contacts **sur la circonférence** de l'échantillon;
- **Petits contacts** par rapport aux **dimensions de l'échantillon**;
- **Épaisseur** de l'échantillon **uniforme**.



Forme conseillée



Forme acceptée



Connexions à éviter



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE VAN DER PAUW

Principe de la méthode

Pour effectuer une mesure, on fait circuler un courant continu entre deux contacts successifs (1,2), par exemple, et mesurer la tension qui apparaît entre les deux autres (3,4).

On refait la même chose en faisant circuler un courant entre les deux contacts (2,3) et mesurer la tension entre les deux autres (4,1).

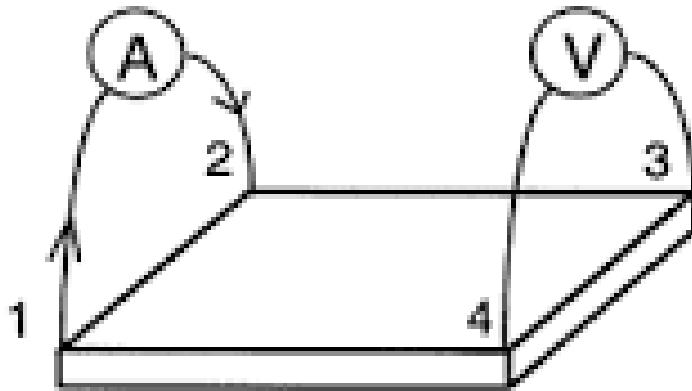
En appliquant la loi d'ohm, on calcule les 2 résistances:

$$R_{12,34} = V_{34} / I_{12} \quad \text{et} \quad R_{23,41} = V_{41} / I_{23}$$

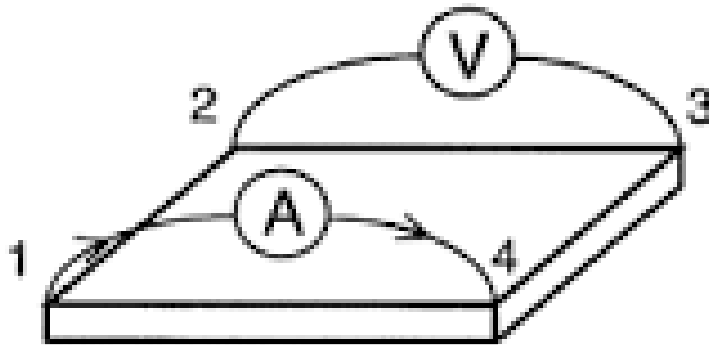


MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE VAN DER PAUW



$$R_A = V_{43} / I_{12}$$



$$R_B = V_{23} / I_{14}$$



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE VAN DER PAUW

Principe de la méthode (suite)

A partir des mesures précédentes, Van der Pauw a établi l'expression suivante:

$$\rho = f \frac{\pi w}{2 \ln 2} (R_{12,34} + R_{23,41})$$

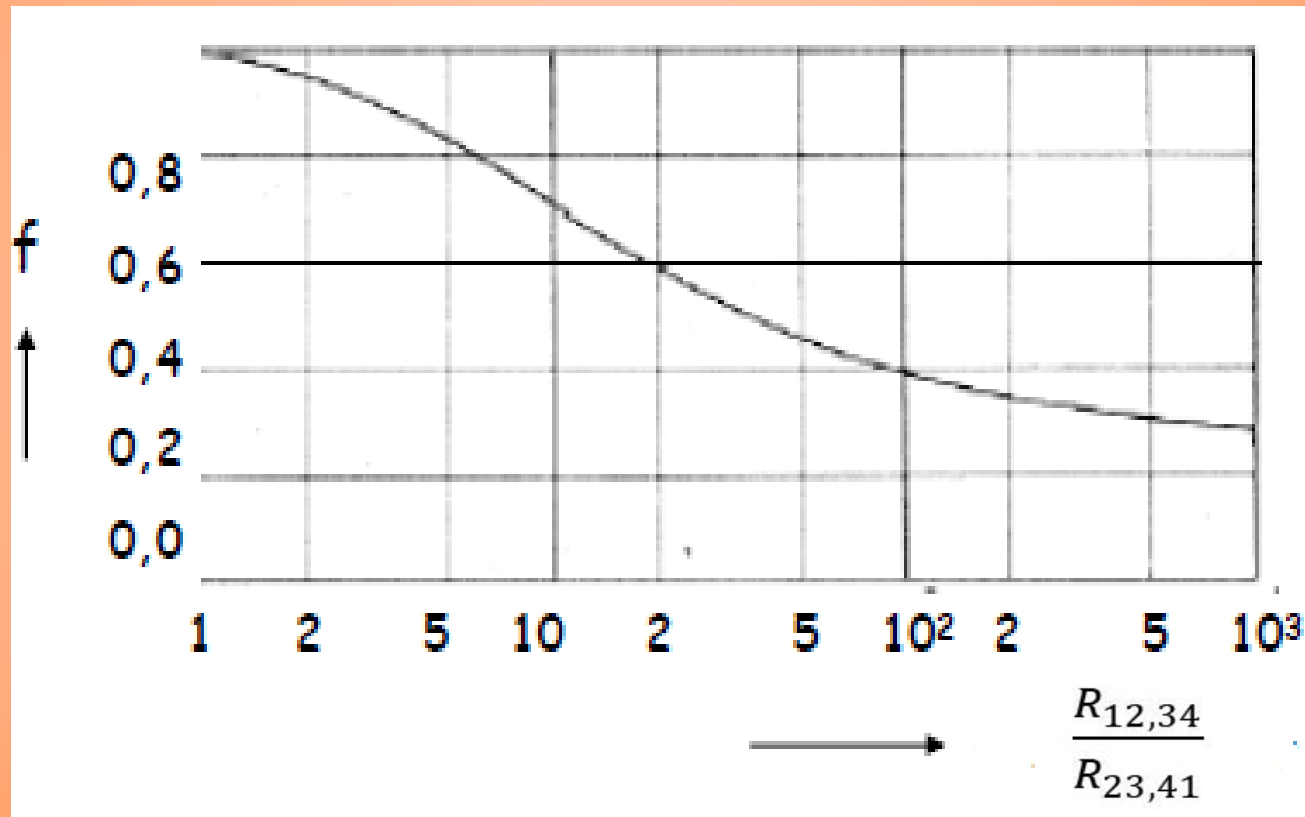
f est la fonction de Van der Pauw, donnée par l'expression:

$$\frac{f}{\ln 2} \operatorname{ar\,cosh} \left(\frac{e^{\frac{\ln 2}{f}}}{2} \right) = \frac{\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}} - 1}{\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}} + 1}$$



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE VAN DER PAUW



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE VAN DER PAUW

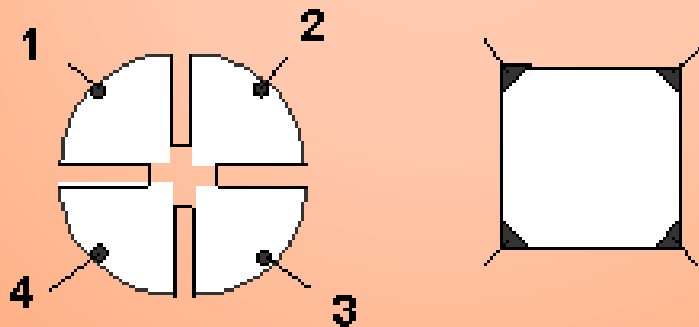
Cas d'un échantillon symétrique

Si l'échantillon est symétrique (circulaire ou carré), alors on a:

$$R_{12,34} = R_{23,41} \Rightarrow f = 1$$

Ce qui donne:

$$\rho = \frac{\pi w}{\ln 2} R_{12,34} \Rightarrow R_{\square} = \frac{\rho}{w} = \frac{\pi}{\ln 2} R_{12,34} = 4.53 R_{12,34}$$

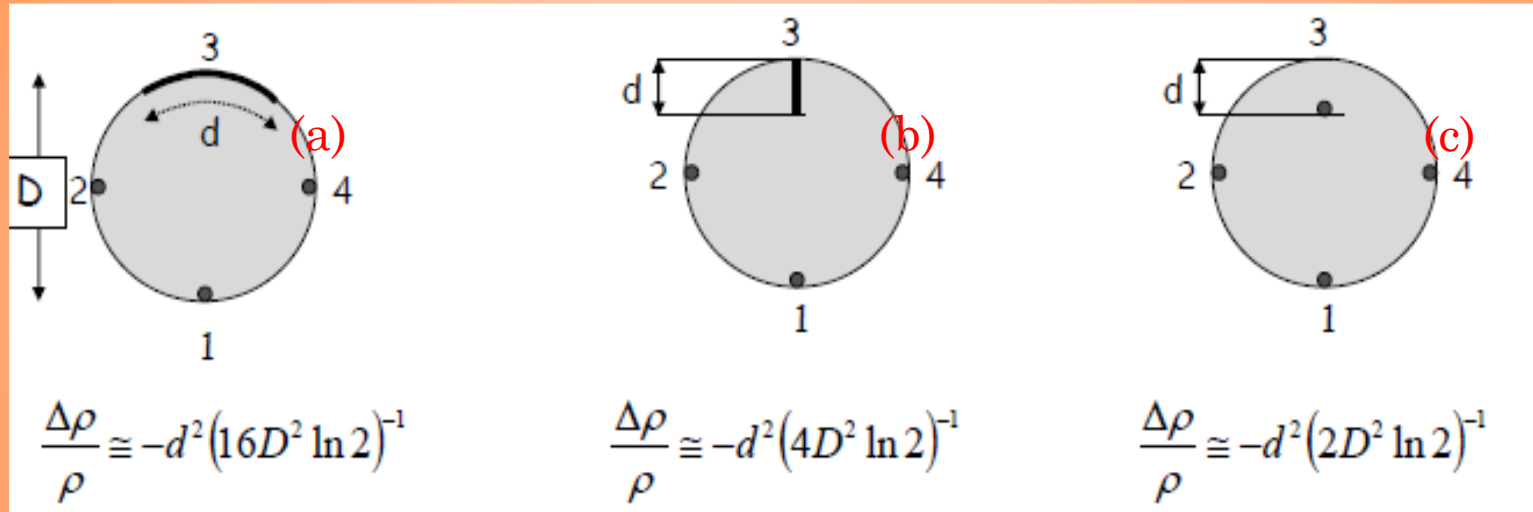


MÉTHODES ÉLECTRIQUES

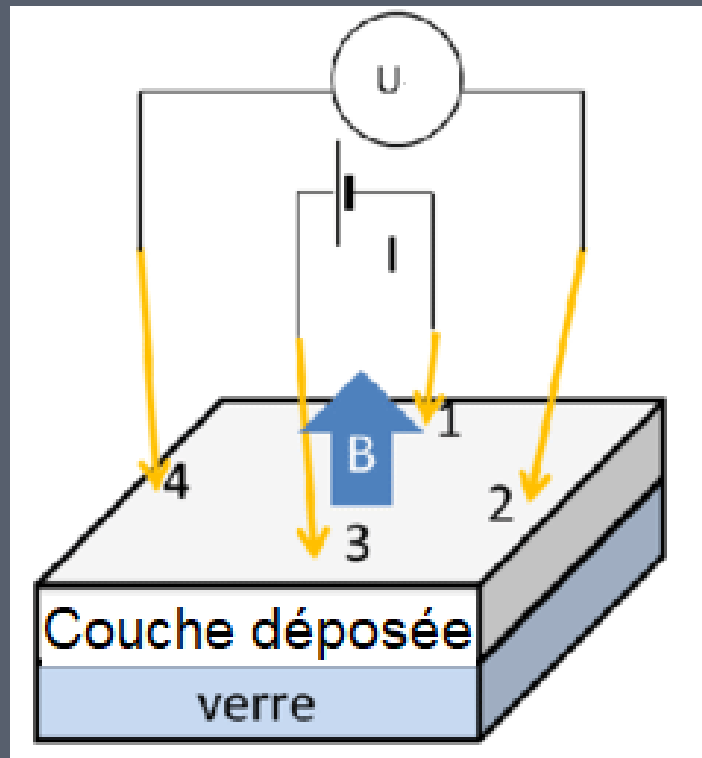
TECHNIQUE DE VAN DER PAUW

Sources d'erreurs

Les erreurs sont introduites par la taille, la position ou la géométrie du contact comme il est indiqué ci-dessous.



- Le contact a une longueur d selon la périphérie ;
- Le contact a une longueur d perpendiculaire à la périphérie ;
- Le contact, bien qu'il est un point, est situé à une distance d de la périphérie

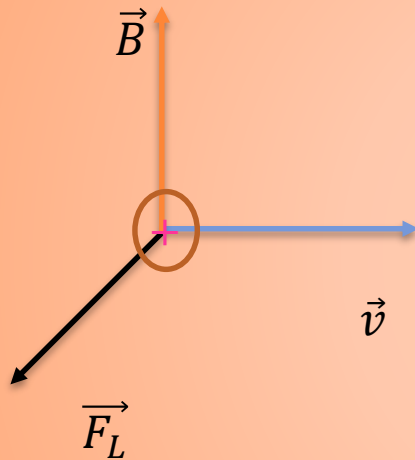


4.2.4: Technique basée sur l'effet Hall

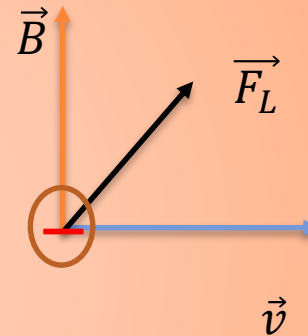
MÉTHODES ÉLECTRIQUES (EFFET HALL)

Effet de l'induction magnétique sur une charge électrique

Force de Lorentz: $\vec{F}_L = q \vec{v} \wedge \vec{B}$



Cas d'une charge positive



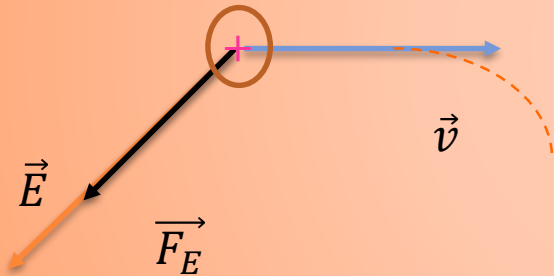
Cas d'une charge négative



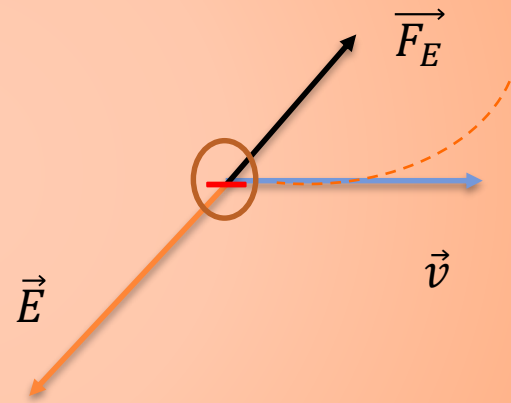
MÉTHODES ÉLECTRIQUES (EFFET HALL)

Effet d'un champ électrique sur une charge électrique

Force électrique: $\vec{F}_E = q \vec{E}$



Cas d'une charge positive



Cas d'une charge négative



MÉTHODES ÉLECTRIQUES (EFFET HALL)

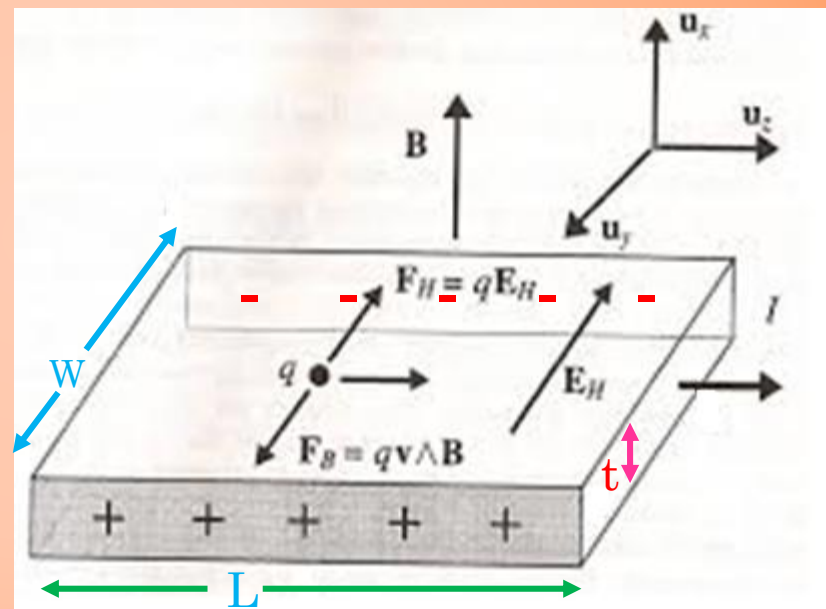
Description de l'effet Hall

- Si un courant I parcourt, suivant l'axe x , un barreau rectangulaire de section $w \times t$.

et

- Si un champ B magnétique constant est appliqué perpendiculairement à la direction du transport (suivant l'axe z).

- Il se produira une tension V_H (donc un champ E_H) proportionnelle à B et I ($V_H = k B I$)



MÉTHODES ÉLECTRIQUES (EFFET HALL)

Calcul de la tension de Hall (Cas du S/C type n)

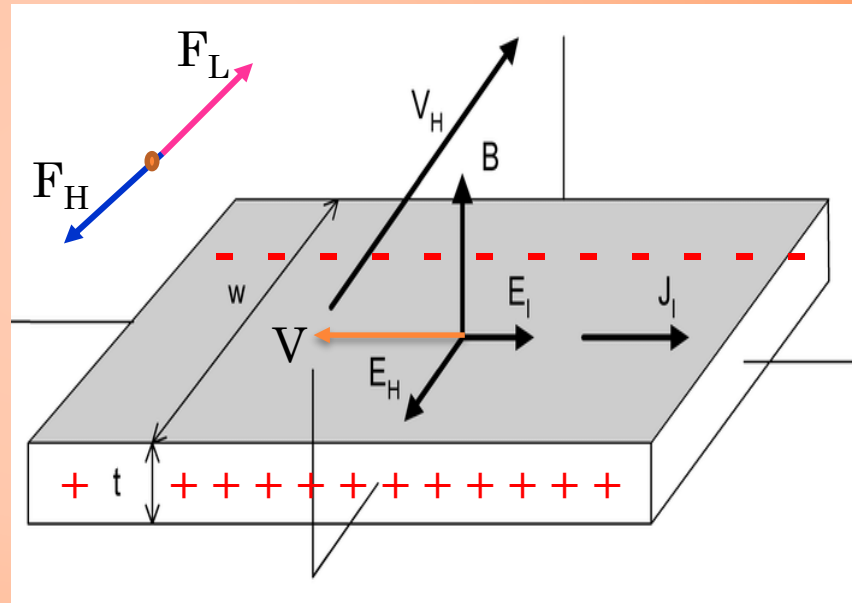
On écrit que la force de Lorentz est équilibrée par la force créée par le champ de Hall.

$$\vec{F}_L = -q\vec{v} \wedge \vec{B} = -q(-v_y B_z)$$

$$\vec{F}_H = -q\vec{E}_H$$

$$\vec{F}_L + \vec{F}_H = 0 \Rightarrow \frac{E_H}{J_y B_z} = \frac{1}{nq} = -R_H$$

$$V_H = -R_H \frac{I B}{t}$$



R_H est le coefficient de Hall.

MÉTHODES ÉLECTRIQUES (EFFET HALL)

Expression plus précise pour le coefficient de Hall

$$R_H = \frac{r \left[p - n \left(\frac{\mu_n}{\mu_p} \right)^2 \right]}{q \left(p + \frac{\mu_n}{\mu_p} n \right)^2}$$

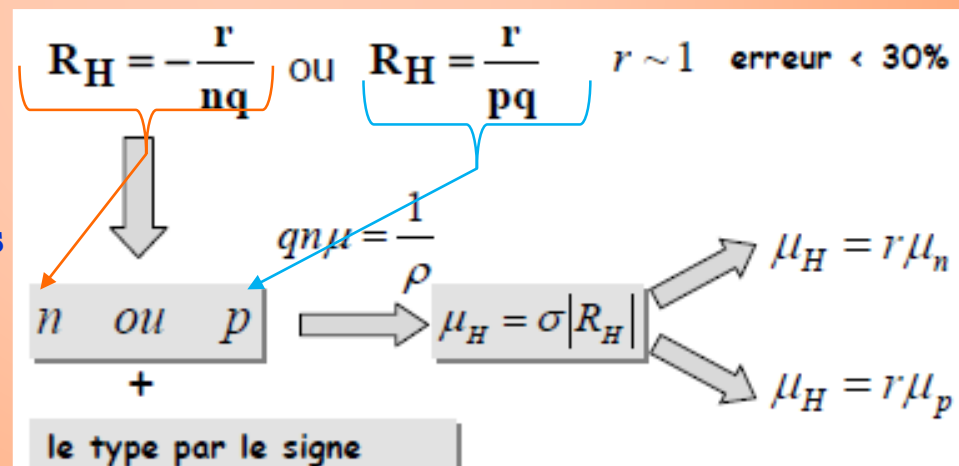
R_H : coefficient de Hall ($\text{m}^3 \text{C}^{-1}$)

r : constante de Hall

$r = 3\pi/8 = 1,18$ pour la collision sur les atomes du réseau

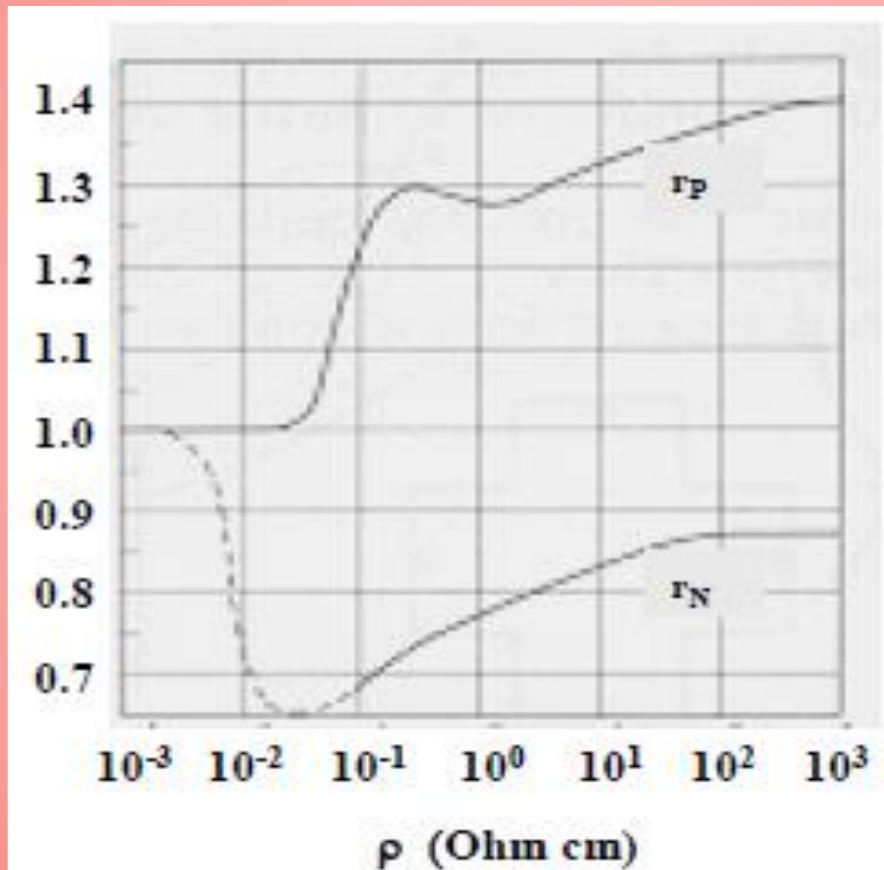
$r = 315 \pi/512 = 1,93$ pour la collision sur les impuretés ionisées

Pour les S/c extrinsèques



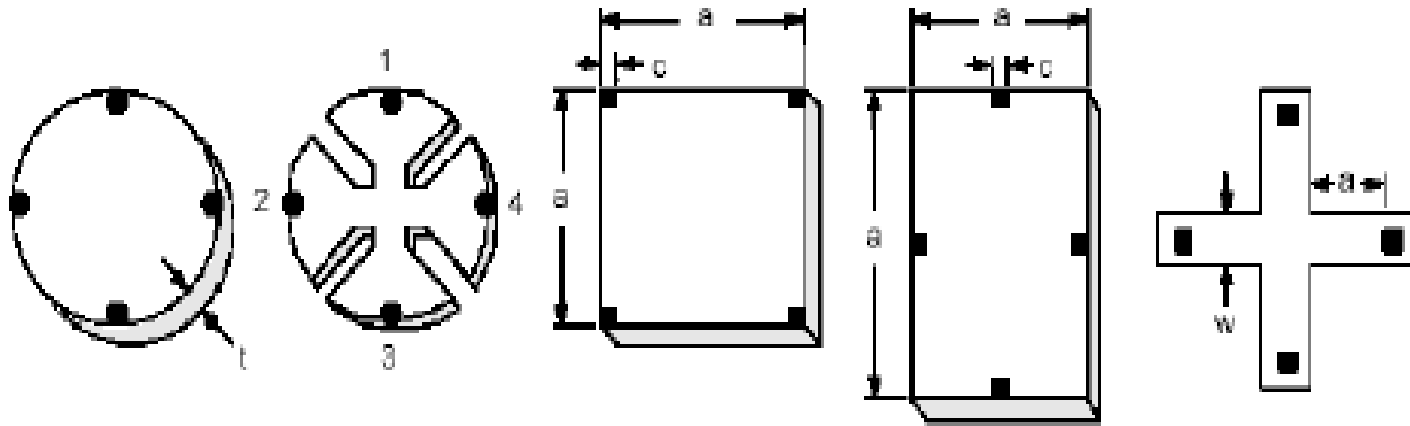
MÉTHODES ÉLECTRIQUES (EFFET HALL)

Abaque des constantes de Hall



MÉTHODES ÉLECTRIQUES (EFFET HALL)

Géométries retenues pour la mesure Hall



Cercle

feuille
de trèfle

carré

rectangle

croix Grecque



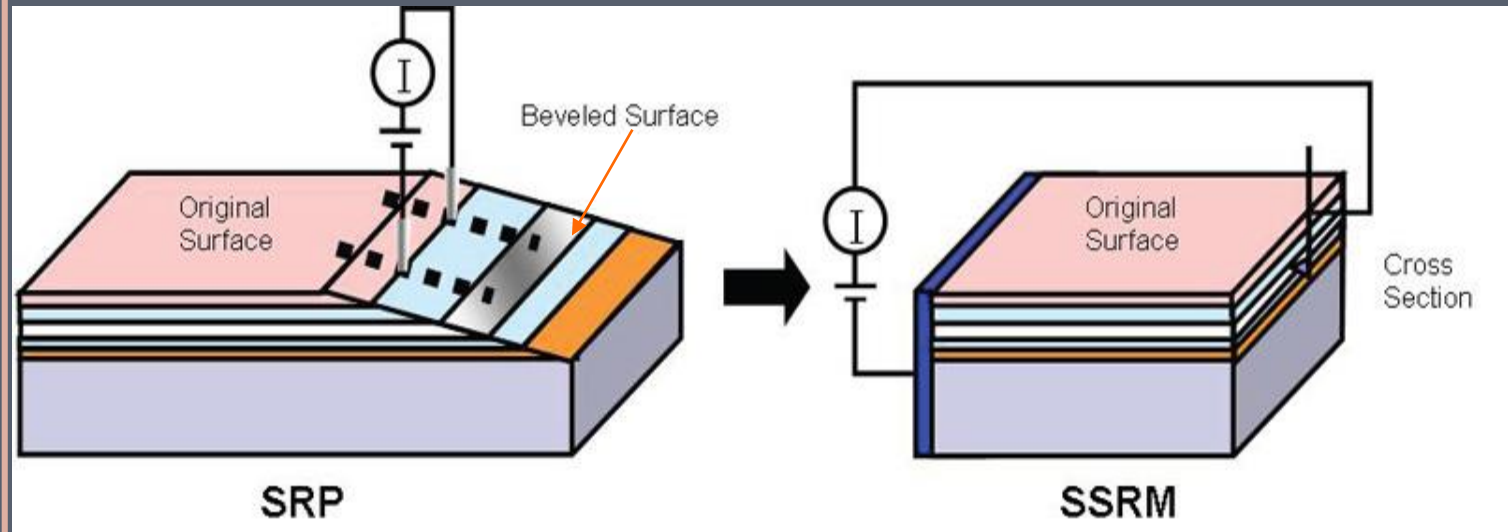
MÉTHODES ÉLECTRIQUES (EFFET HALL)

Possibilités offertes

La mesure de la tension de Hall nous permet d'accéder aux paramètres électriques suivants:

- ❑ La **concentration** de porteurs;
- ❑ Le **type du matériau** (p ou n, à partir du signe de la tension de Hall);
- ❑ Couplée avec une mesure de résistivité, permet la **détermination de la mobilité**.





4.2.5: Technique basée sur la mesure de la résistance de constriction (Spreading resistance)

TECHNIQUE BASÉE SUR LA MESURE DE LA RÉSISTANCE DE CONSTRICTION

Définition

La résistance de constriction d'un semi-conducteur est définie par la distribution des atomes dopants dans la direction normale à sa surface.

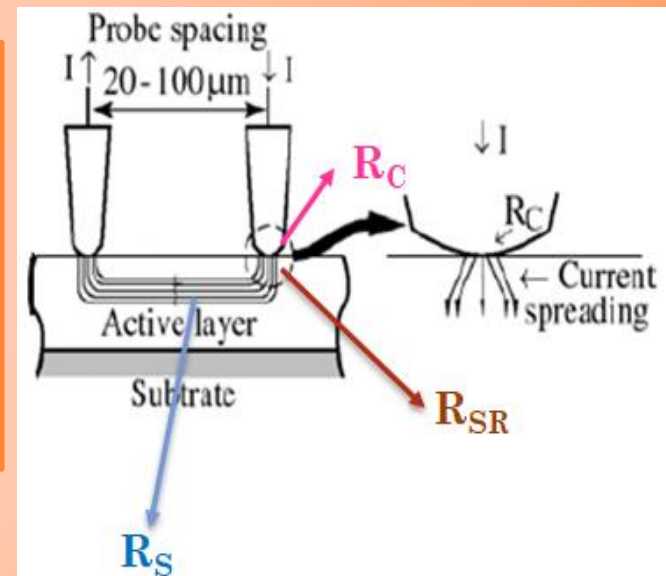
$$R_m = 2R_C + 2R_{SR} + R_S$$

R_m : Résistance mesurée

R_C : Résistance du contact Semic.-pointe

R_{SR} : Spreading résistance sous la pointe

R_S : Résistance volumique entre les pointes



But

Convertir la résistance mesurée le long de la surface d'un biseau à un profil de résistivité en profondeur (profiling)

TECHNIQUE BASÉE SUR LA MESURE DE LA RÉSISTANCE DE CONSTRICTION

Conduite de la manipulation

- ❑ Préparation du biseau qui joue le rôle de support pour l'échantillon;
- ❑ Fixer l'échantillon sur le biseau;
- ❑ Effectuer une abrasion de l'échantillon à l'aide d'une solution abrasive dont le diamètre des particules $d=0,05-0,25 \mu\text{m}$;
- ❑ Prendre une série de mesures comme il est indiqué sur la Fig.3.

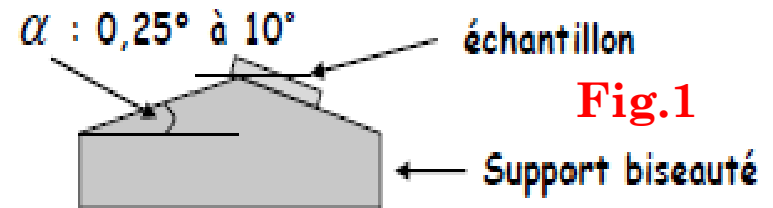


Fig.1

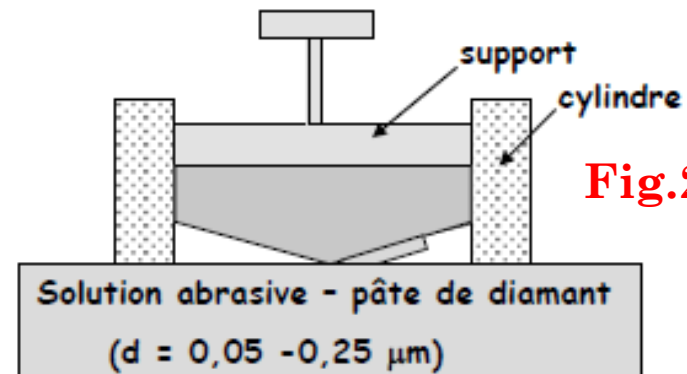


Fig.2

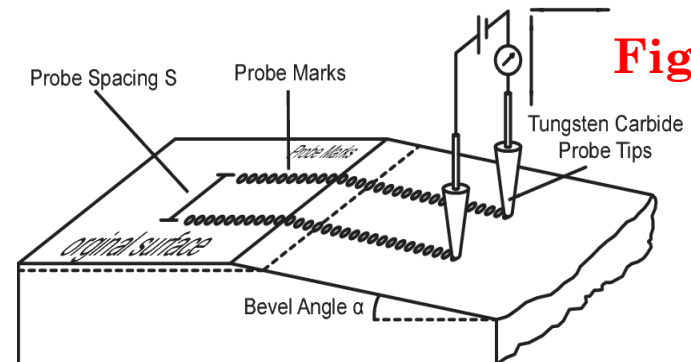


Fig.3



TECHNIQUE BASÉE SUR LA MESURE DE LA RÉSISTANCE DE CONSTRICTION

Conduite de la manipulation

(Suite)

- Pour chaque pas Δx , auquel correspond une hauteur:

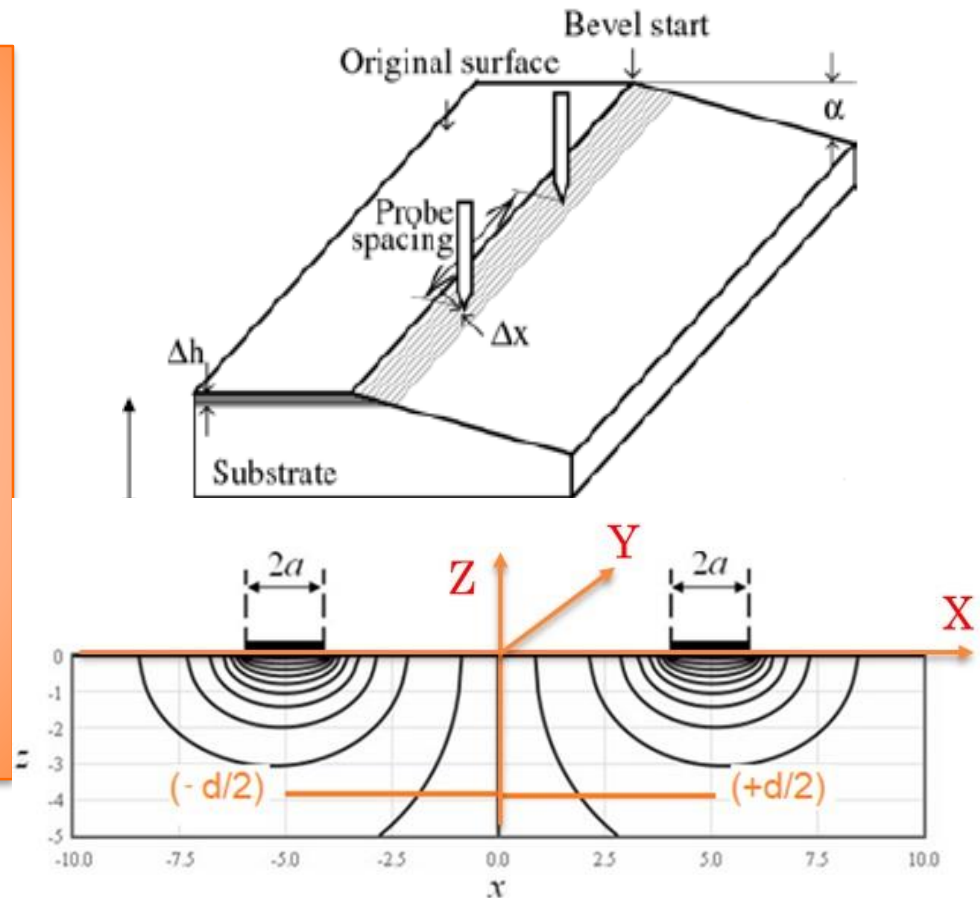
$$\Delta h = \Delta x \sin(\alpha)$$

prendre une mesure I-V;

- Calculer la résistance de constriction à partir de l'expression simplifiée ou générale données ci-dessous.

$$R_{SR} = V/I = \rho / 4a$$

$$R_{SR} = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{\pi} \left(\frac{1}{a_1} \tan^{-1} \left(\tanh \left(\frac{1}{2} \cosh^{-1} \frac{d-a_2}{a_1} \right) \right) + \frac{1}{a_2} \tan^{-1} \left(\tanh \left(\frac{1}{2} \cosh^{-1} \frac{d-a_1}{a_2} \right) \right) \right)$$



En pratique $a_1 = a_2 = a$ avec a le rayon de la pointe et d la distance entre les pointes

TECHNIQUE BASÉE SUR LA MESURE DE LA RÉSISTANCE DE CONSTRICTION

Points forts

- ❑ Bonne résolution (de l'ordre de 5 nm);
- ❑ Elle permet d'explorer presque n'importe quelle combinaison de couches.
- ❑ Elle donne accès à la distribution des dopants dans les matériaux semi-conducteurs ainsi que la délimitation exacte des jonctions pn.

Points faibles

- ❑ Technique destructive;
- ❑ Préparation délicate de l'échantillon et du biseau;
- ❑ Elle nécessite un calibrage et un reconditionnement périodique des pointes;
- ❑ Elle présente une forte dépendance de l'algorithme utilisé pour la conversion Résistance-Profil de concentration.



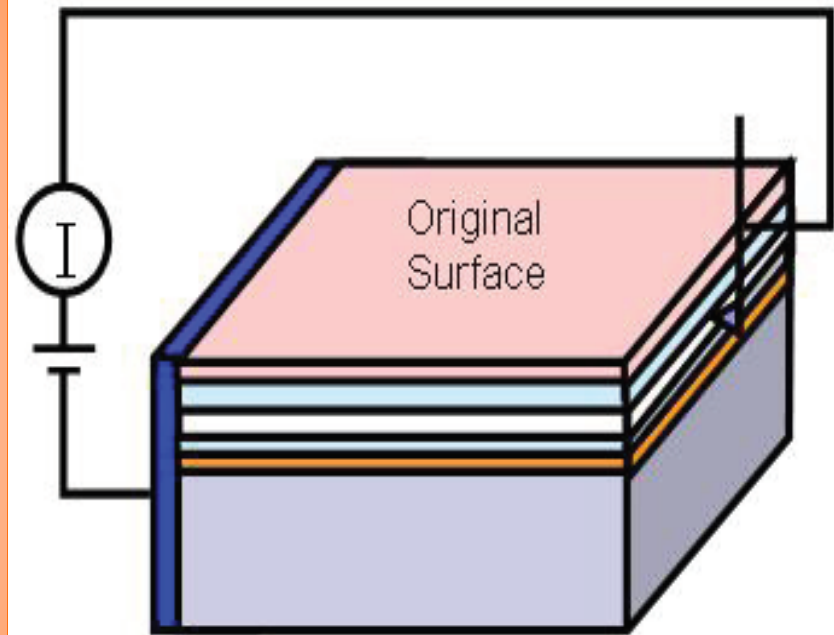
TECHNIQUE BASÉE SUR LA MESURE DE LA RÉSISTANCE DE CONSTRICTION

Version récente de SR

Une nouvelle méthode basée sur l'utilisation de la pointe du microscope AFM pour balayer une petite région de dispositif comme il est indiqué sur la Figure ci-contre.

Cette technique a donné naissance à une nouvelle microscopie appelée:

Scanning Spreading Resistance Microscopy (SSRM)



4-MÉTHODES ÉLECTRIQUES

4.3.: Caractérisation du dispositif

4.3.1.: Technique de la jonction pn



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA JONCTION

Méthodes utilisées

- Exploiter la caractéristique I-V;
- Exploiter la caractéristique C-V en régime petits signaux et pour $f \sim 1$ MHz.

Possibilités offertes

- Concentration des impuretés dans la partie la moins dopée;
- Facteur d'idéalité;
- Tension de claquage;
- Durée de vie des porteurs minoritaires.



4.3.1.: TECHNIQUE DE LA JONCTION PN

Technique 1

EXPLOITATION DE LA CARACTERISTIQUE I(V)

MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA JONCTION

Jonction pn idéale

Expression simplifiée du courant

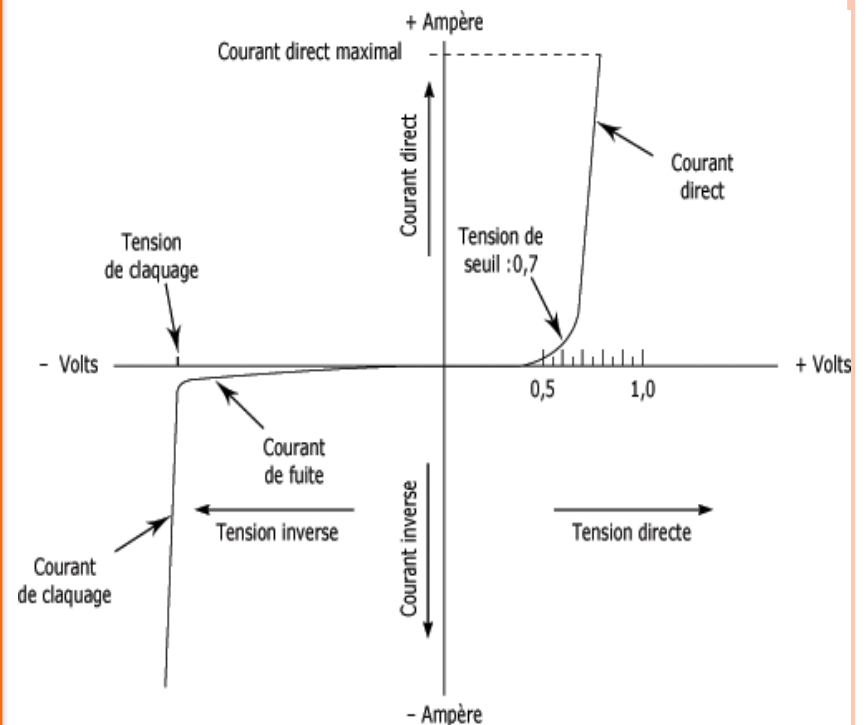
$$I = I_s \left(\exp\left(\frac{qV_d}{nkT}\right) - 1 \right)$$

$$I = I_s e^{\frac{qV_d}{nkT}} \Rightarrow \ln I = \ln I_s + \frac{qV_d}{nkT}$$

Avec:

- **I_s**: courant de saturation
- **n**: facteur d'idéalité

Caractéristique I(V) (échelle linéaire)



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA JONCTION

Jonction pn idéale

Expression simplifié du courant

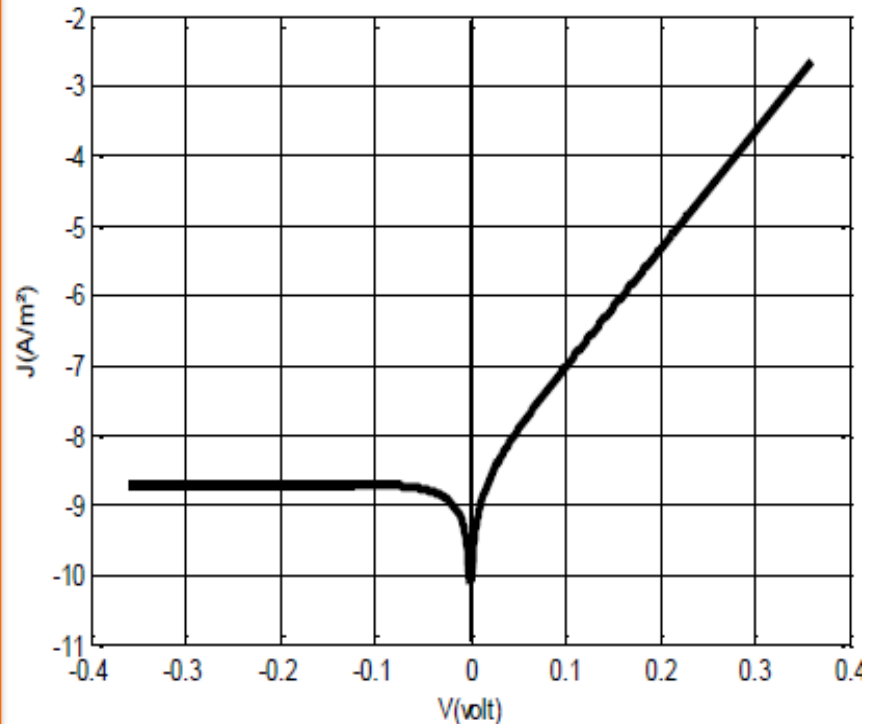
$$I = I_s \left(\exp\left(\frac{qV_d}{nkT}\right) - 1 \right)$$

$$I = I_s e^{\frac{qV_d}{nkT}} \Rightarrow \ln I = \ln I_s + \frac{qV_d}{nkT}$$

Avec:

- **I_s**: courant de saturation
- **n**: facteur d'idéalité

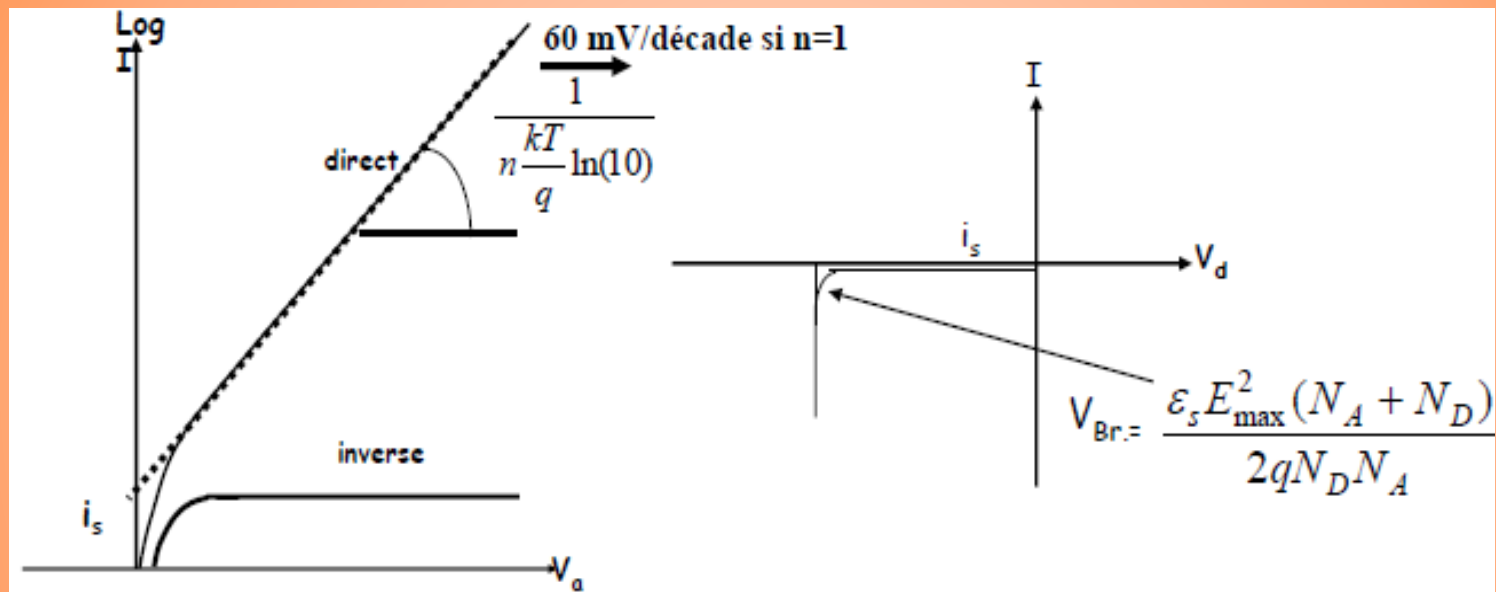
Caractéristique I(V)
(échelle semi-logarithmique)



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA JONCTION

Exploitation de la caractéristique I(V)



La pente permet l'extraction du facteur d'idéalité.
L'ordonnée à l'origine permet l'extraction de i_s .

Extraction du courant inverse i_s .
Extraction de la tension de claquage.

MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA JONCTION

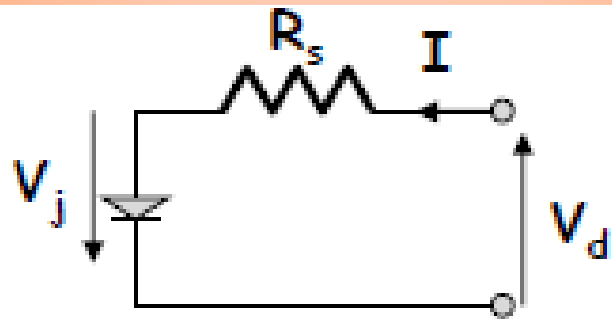
Jonction abrupte réelle

appliquée sur la diode

au niveau de la jonction

$$V_d = V_j + IR_s$$

$$I = I_s \left(e^{\frac{q(V_d - IR_s)}{nkT}} - 1 \right)$$



- Faibles courants : $R_s I \ll V_j$ et presque toute la tension aux bornes de la diode se retrouve sur la jonction :

$$V_d \cong V_j$$

- Forts courants directs : $R_s \cdot I \gg V_j$ et presque toute la tension aux bornes de la diode se retrouve sur la résistance série :

$$V_d \cong R_s I_d$$

la diode est alors assimilable à une résistance.

MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA JONCTION

Composantes du courant d'une jonction pn

Le courant d'une jonction est dû :

à la recombinaison dans la ZCE

à la diffusion/recombinaison dans la zone neutre

$$I = \frac{qn_i}{2\tau} x_{js} \left(e^{\frac{q(V_d - IR_s)}{2kT}} - 1 \right) + I_s \left(e^{\frac{q(V_d - IR_s)}{nkT}} - 1 \right)$$
$$I_s = S \cdot qn_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right)$$

Ordre de grandeur des paramètres

- $J_S \sim 10^{-11} \text{ A cm}^{-2}$
- $\tau \sim 10^{-6} \text{ s}$
- $1 \leq n \leq 2$
- $J_R \sim 10^{-5} \text{ A cm}^{-2}$ à $V_a = -10 \text{ V}$



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

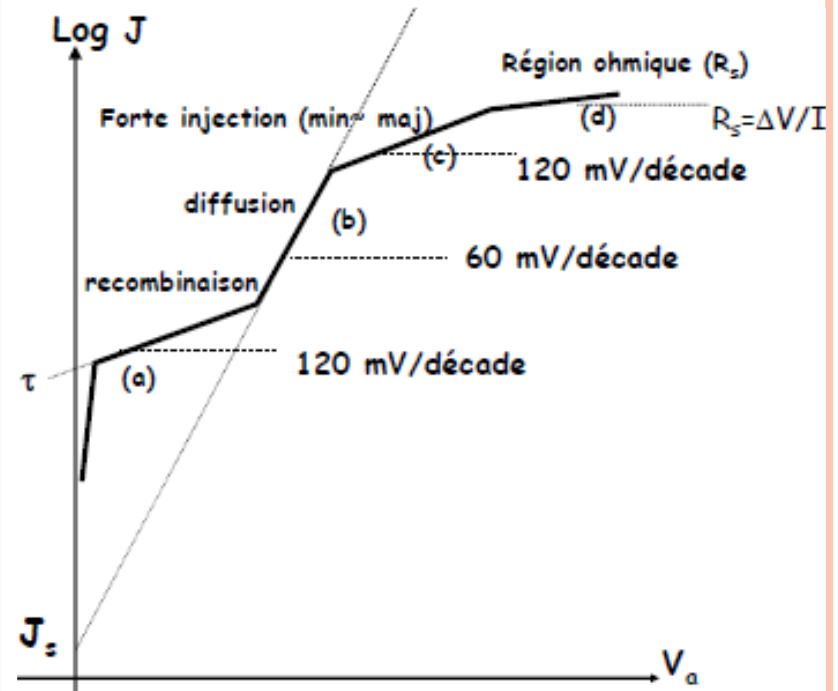
TECHNIQUE DE LA JONCTION

Durée de vie porteurs minoritaires

- 1) La partie (a) de la courbe nous donne J_{rec} .
- 2) La caractéristique $C(V)$ nous donne X_t .
- 3) L'expression du courant J_{rec} :

$$J_{rec.} = \frac{qn_i}{2\tau} x_t \left[\exp\left(\frac{qVa}{2kT}\right) - 1 \right]$$

Nous donne la durée de vie τ , car X_t est déterminée à partir d'une mesure $C(V)$,



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA JONCTION

1) Facteur d'idéalité

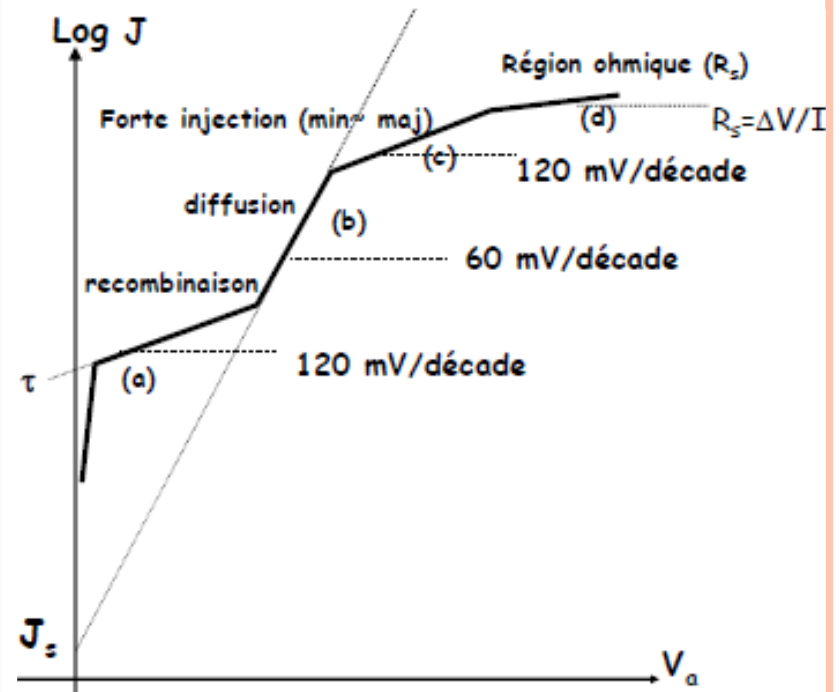
La partie (b) de la courbe nous donne le facteur d'idéalité n .

$$pente = \frac{1}{n \frac{kT}{q} \ln(10)} \Rightarrow n = \frac{1}{pente \cdot \frac{kT}{q} \ln(10)}$$

2) Résistance série

La partie (d) (régime ohmique) nous donne la résistance série:

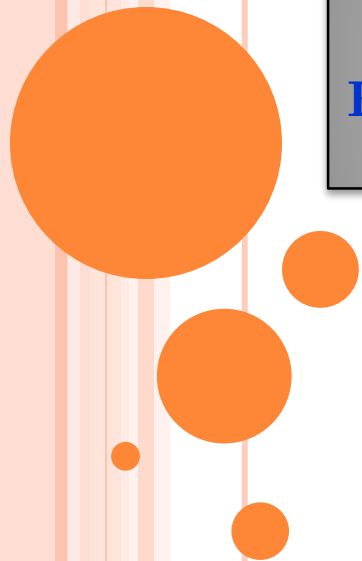
$$R_s = \frac{dV}{dI}$$



4.3.1.: TECHNIQUE DE LA JONCTION PN

Technique 2

EXPLOITATION DE LA CARACTERISTIQUE C(V)



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA JONCTION

La capacité d'une jonction pn abrupte

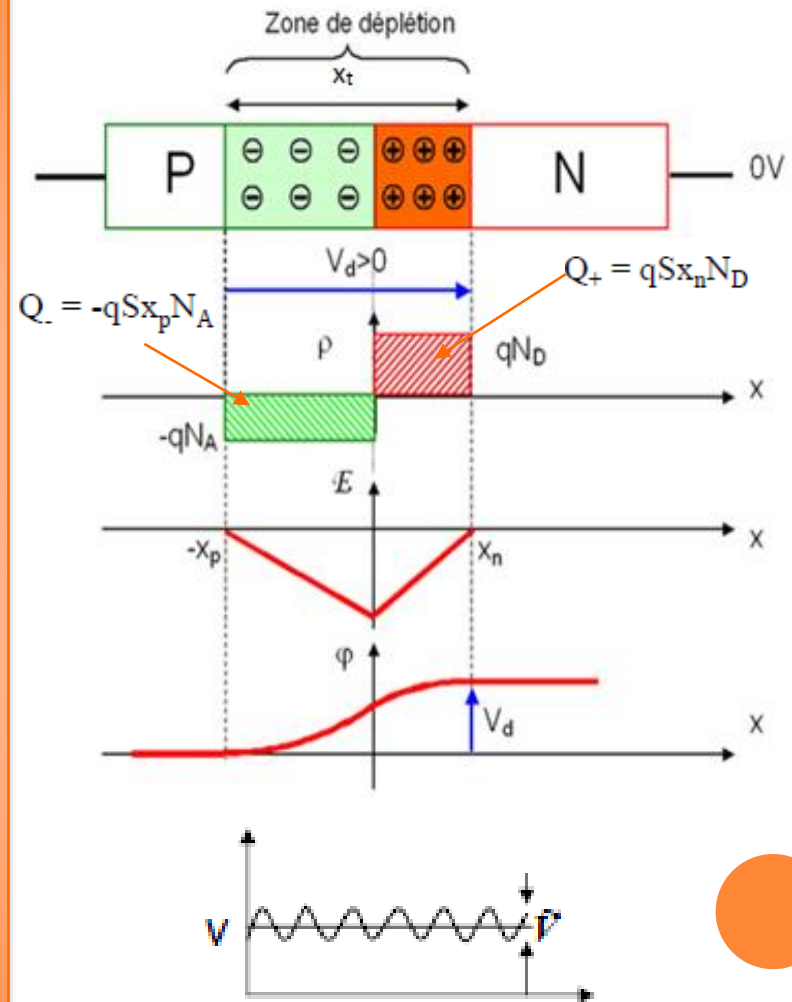
N.B.: La capacité de déplétion statique *domine* sous les conditions de *polarisation inverse*.

On obtient la caractéristique $C(V)$ en appliquant un signal du type:

$$V(t) = V + \Delta v \sin(\omega t)$$

On a donc, toute variation dV conduit à une modulation de d_{x_n, x_p} donc de dQ ,

$$dQ = CdV \quad \Rightarrow \quad C = dQ/dV$$



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA JONCTION

La capacité d'une jonction pn abrupte (suite)

$$x_t = \left[\frac{2\epsilon_{si}(V_d - V_a)}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) \right]^{1/2} = \left[\frac{2\epsilon_{si}kT}{q^2} \left(\ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{1/2}$$

$$x_n = \frac{N_A}{N_A + N_D} x_t \quad x_p = \frac{N_D}{N_A + N_D} x_t$$

$$|Q| = qSx_n N_D = qSx_p N_A = qS \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} x_t = qS \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \left[\frac{2\epsilon_{si}(V_d - V_a)}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) \right]^{1/2}$$

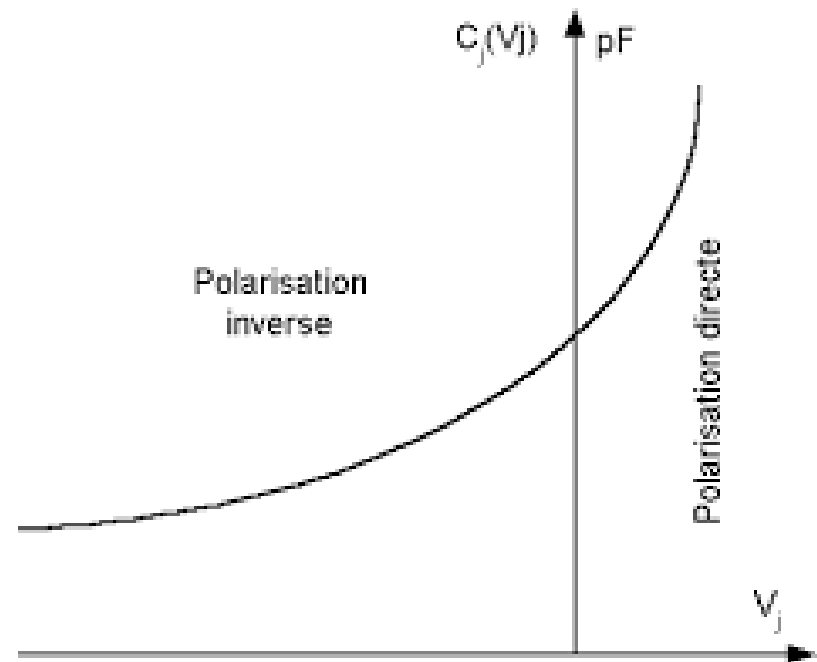
$$C = \left| \frac{dQ}{d(V_d - V_a)} \right| = \frac{S}{2} \left[\frac{2q\epsilon_{si}}{(V_d - V_a)} \left(\frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right) \right]^{1/2} = \frac{S\epsilon_{si}}{x_t}$$

MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA JONCTION

La capacité d'une jonction pn abrupte (suite)

Pour une jonction PN, la capacité de la jonction évolue en fonction de la tension appliquée, car l'épaisseur de la zone désertée varie

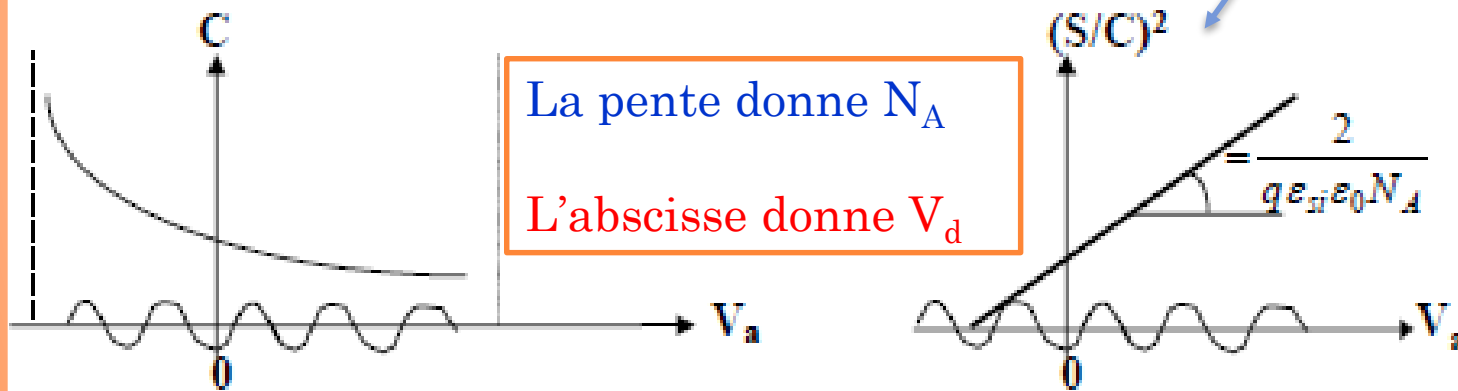


MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA JONCTION

Exploitation de la caractéristique C(V)

$$dQ = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{sc} S}{w} dV \Rightarrow C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{sc} S}{x_f} \Rightarrow \frac{C}{S} = \frac{\left(\frac{q \epsilon_0 \epsilon_{sc} N_A}{2} \right)^{1/2}}{(V_d - V_a)^{1/2}} \Rightarrow \left(\frac{S}{C} \right)^2 = \frac{V_d - V_a}{\frac{q \epsilon_{si} \epsilon_0 N_A}{2}}$$

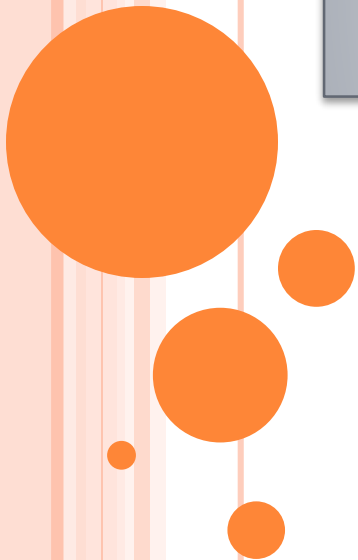


Relation linéaire entre $1/C^2$ et $V \Rightarrow$ pente $\propto 1/N_A$
Intersection avec l'axe x $\Rightarrow V_d$



4.3.2.: TECHNIQUE DE LA DIODE SCHOTTKY

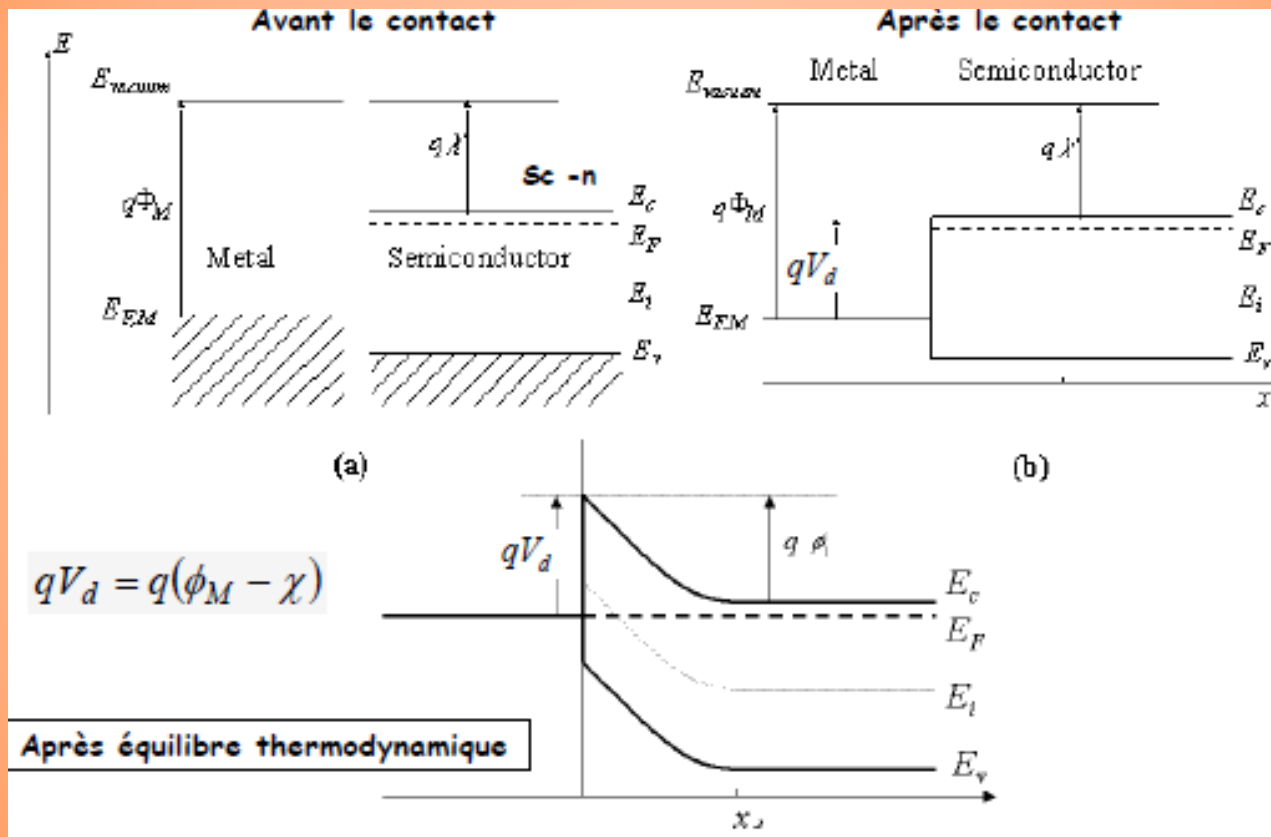
EXPLOITATION DE LA CARACTERISTIQUE C(V)



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA DIODE SCHOTTKY

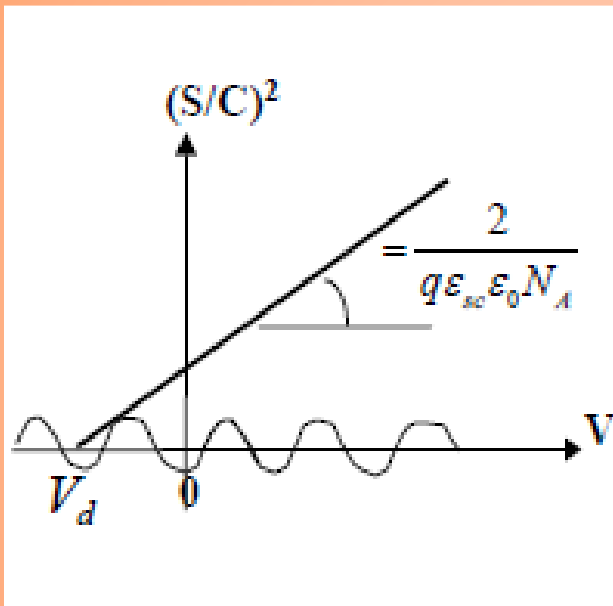
Diagramme de bandes d'énergie



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA DIODE SCHOTTKY

Exploitation de la caractéristique C(V) de la diode Schottky



$$\left(\frac{S}{C(V)}\right)^2 = \frac{2}{q\epsilon_0\epsilon_{sc}N_A}(V - V_d)$$

$$N_A = \frac{2}{q\epsilon_0\epsilon_{sc}S^2 \left[\frac{d\left(\frac{1}{C^2}\right)}{dV} \right]}$$

Si la courbe n'est pas une droite \Rightarrow le dopage n'est pas uniforme

MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA DIODE SCHOTTKY

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_0\epsilon_{sc}}$$

$$dE = \frac{qN_A(w)dw}{\epsilon_{sc}\epsilon_0}$$

Dopage non uniforme

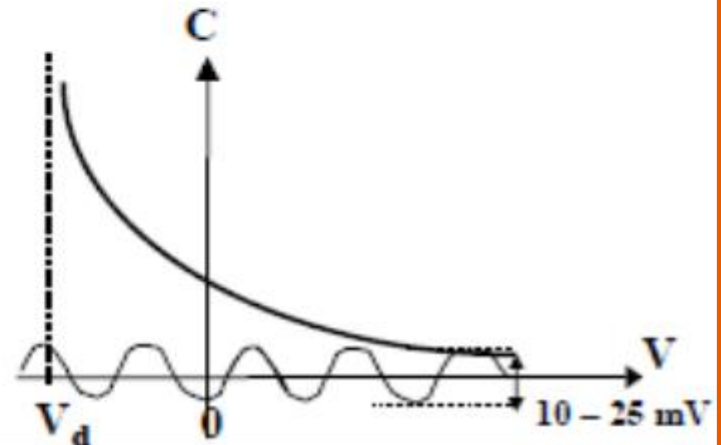
$$-dV = \int_0^w dE dx = \frac{qN_A(w)w dw}{\epsilon_{sc}\epsilon_0} \Rightarrow dV = \frac{-qN_A(w)d(w^2)}{2\epsilon_{sc}\epsilon_0} \Rightarrow N_A(V) = -\frac{2\epsilon_{sc}\epsilon_0}{q} \frac{d(w^2)}{dV}$$

$$w(V) = \frac{S\epsilon_0\epsilon_{sc}}{C(V)} \Rightarrow w^2 = \left(\frac{S\epsilon_0\epsilon_{sc}}{C(V)}\right)^2 \Rightarrow \frac{dw^2}{dV} = (S\epsilon_0\epsilon_{sc})^2 \frac{d\left(\frac{1}{C^2}\right)}{dV} = -2 \frac{(S\epsilon_0\epsilon_{sc})^2}{C^3} \frac{dC}{dV}$$

Et finalement :

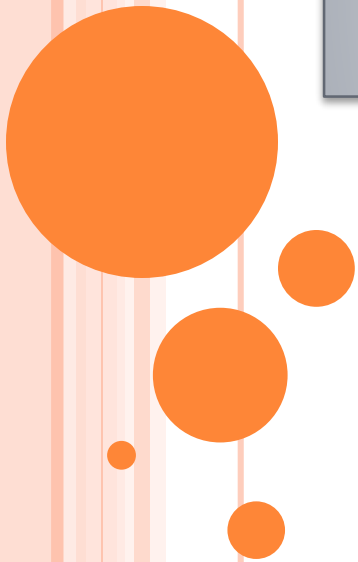
$$N_A(V) = \frac{C^3}{qS^2\epsilon_0\epsilon_{sc}} \frac{dC}{dV}$$

$$w(V) = \frac{S\epsilon_0\epsilon_{sc}}{C(V)}$$



4.3.2.: Technique de la diode MIS

Généralité sur la structure MIS



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

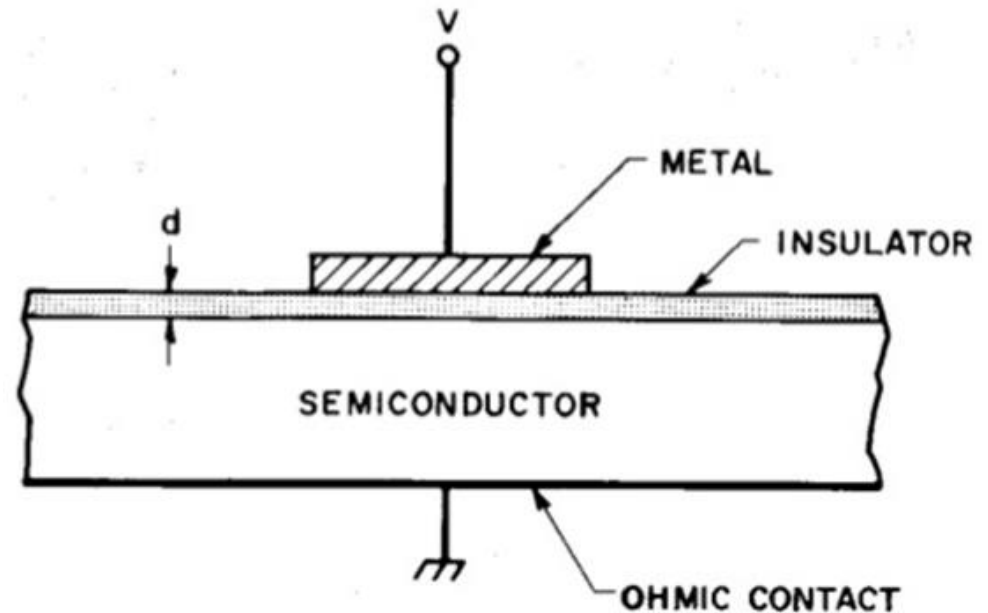
La structure MIS

Le métal est déposé par:

- Evaporation;
- Pulvérisation cathodique.

L'isolant, cas du SiO_2 , est déposé par:

- Pulvérisation cathodique;
- Oxydation thermique;
- Dépôt par CVD.

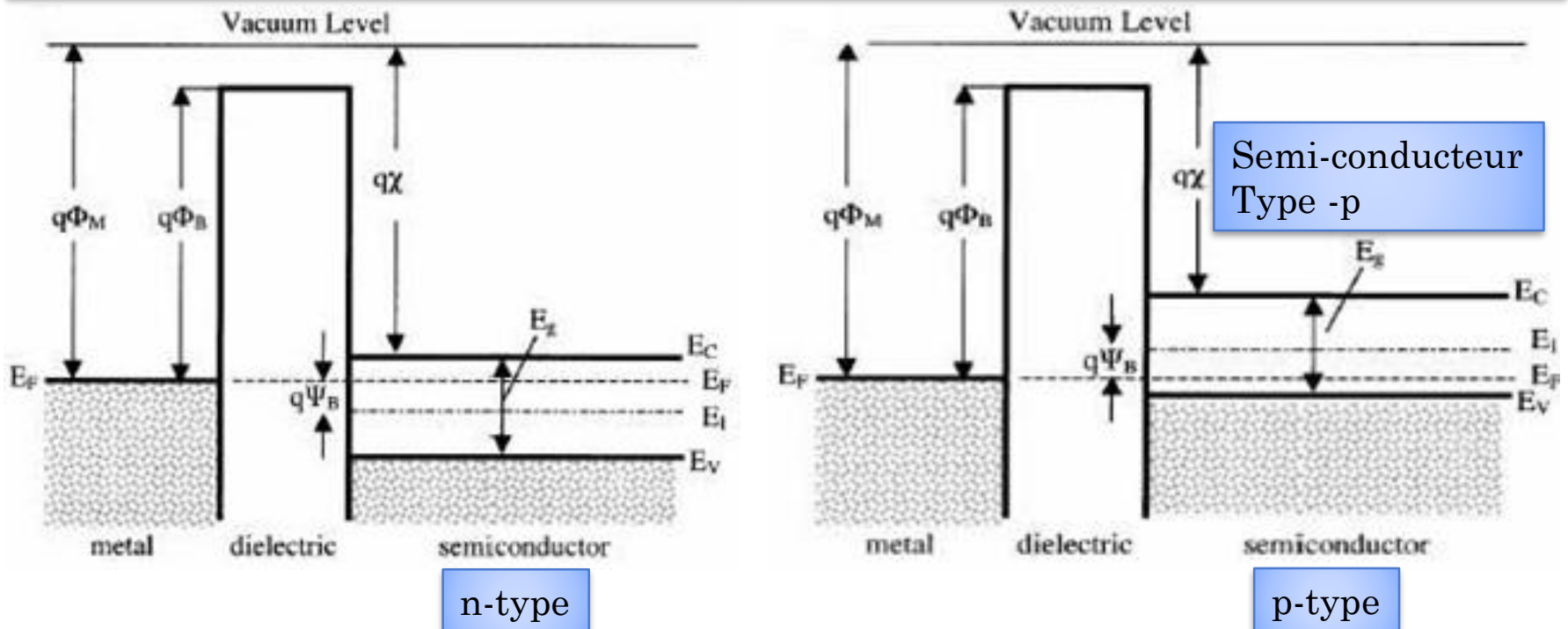


N.B.: Epaisseur de l'isolant est à la fois épais pour que I_G soit faible (effet tunnel négligeable) et mince pour que le semi-conducteur réagisse avec quelques volts appliqué sur la grille ($d_{\text{opt}} \approx 400\text{\AA}$).

MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

Diagramme de bandes d'une structure MIS idéale



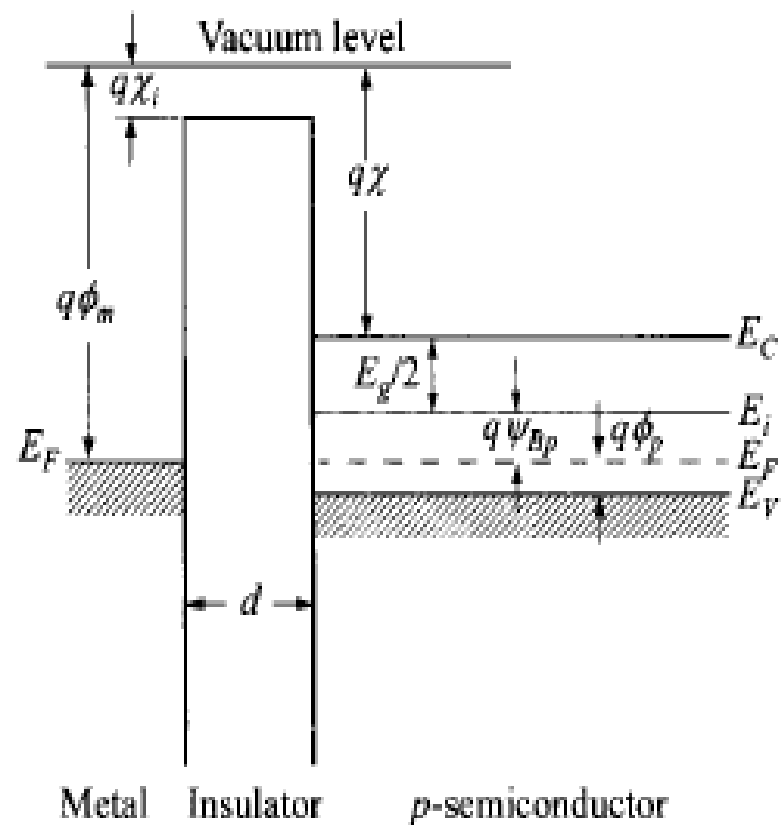
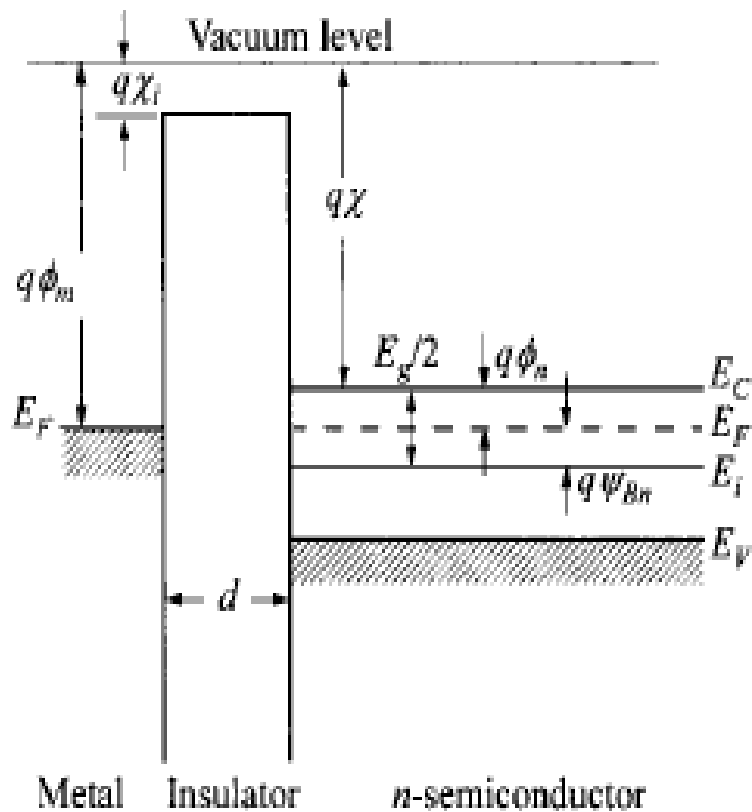
N.B.: Dans le cas où l'isolant est l'oxyde SiO_2 , MIS \Rightarrow MOS



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

Les différents paramètres d'une structure MIS à l'équilibre





MÉTHODES ÉLECTRIQUES
TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

Partie 1: Structure MOS idéale

MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

C'est quoi la structure MOS idéale?

C'est la structure pour laquelle:

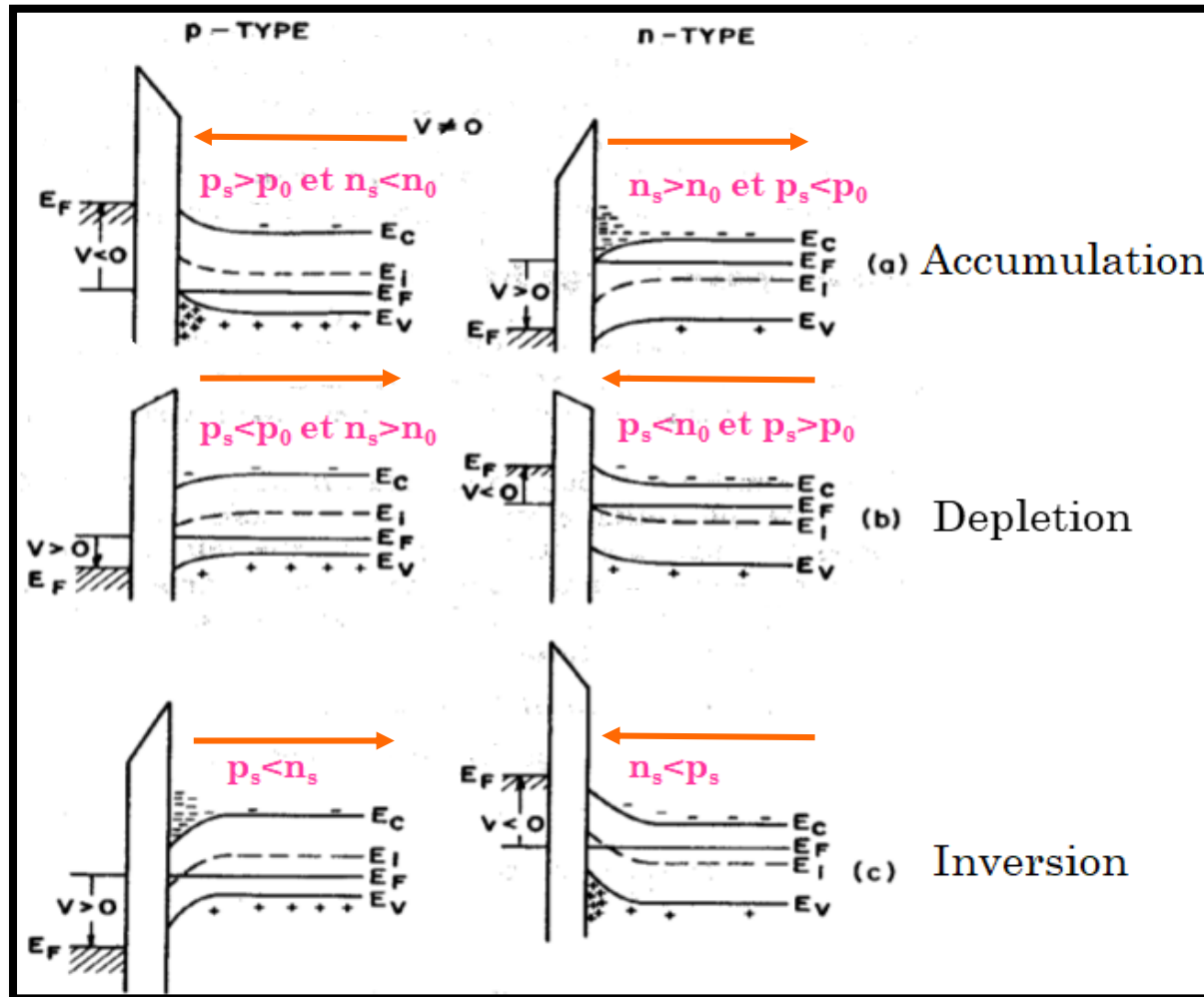
- ❑ Les travaux de sortie du métal et du semi-conducteur sont égaux;
- ❑ Il n'y a pas d'états d'interface entre l'isolant et le semi-conducteur;
- ❑ Il n'y a pas de charges électriques dans l'isolant.



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

Différents régimes de la structure MOS

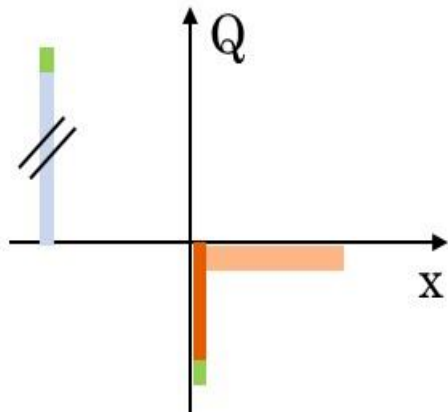


MÉTHODES ÉLECTRIQUES

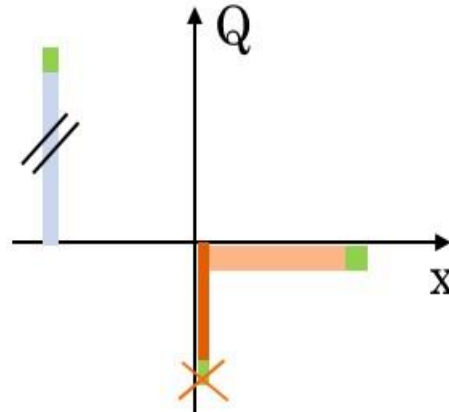
TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

Effet de la fréquence et la vitesse de balayage en régime de forte inversion

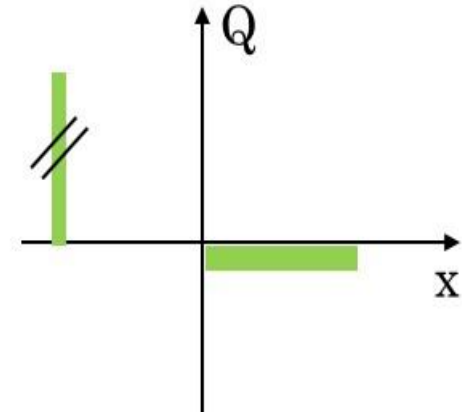
BF +Rampe lente



HF +Rampe lente



HF +Rampe rapide



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

Relation densité de charge-Potentiel de surface

Le potentiel de surface pour les différents régimes de fonctionnement s'évalue par double intégration de "l'équation de Poisson":

$$\frac{d^2 \psi_p}{dx^2} = - \frac{\rho(x)}{\epsilon_s}$$

Qui s'écrit:

$$\frac{d^2 \psi_p}{dx^2} = - \frac{q}{\epsilon_s} \{ p_{po} [\exp(-\beta \psi_p) - 1] - n_{po} [\exp(\beta \psi_p) - 1] \}$$

Et après intégration:

$$\mathcal{E} \equiv -d\psi_p/dx = \pm \frac{\sqrt{2kT}}{qL_D} F\left(\beta \psi_p, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right)$$

Avec:

$$F\left(\beta \psi_p, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right) \equiv \sqrt{[\exp(-\beta \psi_p) + \beta \psi_p - 1] + \frac{n_{po}}{p_{po}} [\exp(\beta \psi_p) - \beta \psi_p - 1]}$$

Ce qui donne:

$$Q_s = -\epsilon_s \mathcal{E}_s = \mp \frac{\sqrt{2} \epsilon_s kT}{qL_D} F\left(\beta \psi_s, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right)$$



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

Expressions approchées de la densité de charge développée à l'interface semi-conducteur-isolant pour les différents régimes

$$Q_{sc,acc} \approx \frac{\epsilon_0 \epsilon_s kT}{qL_D} e^{-\frac{qV_S}{2kT}} \quad \text{avec} \quad L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_s kT}{2q^2 N_A}} < w \quad \text{longueur de Debye}$$

$$V_{S,dés} = \frac{q N_A w^2}{2 \epsilon_0 \epsilon_s} \quad \longrightarrow \quad w = \sqrt{\frac{2 \epsilon_0 \epsilon_s V_S}{q N_A}}$$

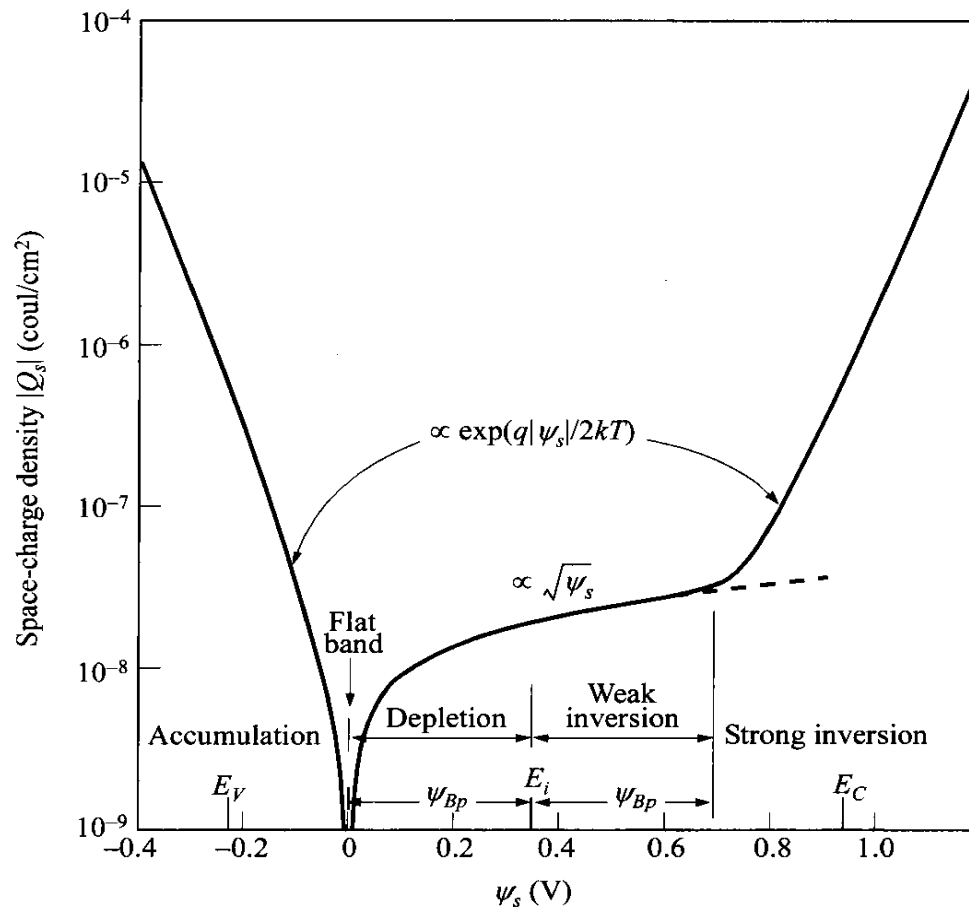
$$Q_{sc,dés} \approx -\frac{\epsilon_0 \epsilon_s kT}{qL_D} \sqrt{\frac{qV_S}{kT}} \quad \text{et} \quad w_{max} = \sqrt{\frac{4 \epsilon_0 \epsilon_s kT}{q^2 N_A} \text{Ln} \frac{N_A}{n_i}}$$

$$V_{S,inv} = \frac{2kT}{q} \text{Ln} \frac{N_A}{n_i} \quad \longrightarrow \quad Q_{sc,inv} \approx -\frac{\epsilon_0 \epsilon_s kT}{qL_D} e^{\frac{q(V_S - 2\phi_F)}{2kT}}$$

MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

Variation de la densité de charge en fonction du potentiel de surface





MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

**Capacité de la Structure
MOS idéale (Sc. Type-p)**

MÉTHODES ÉLECTRIQUES

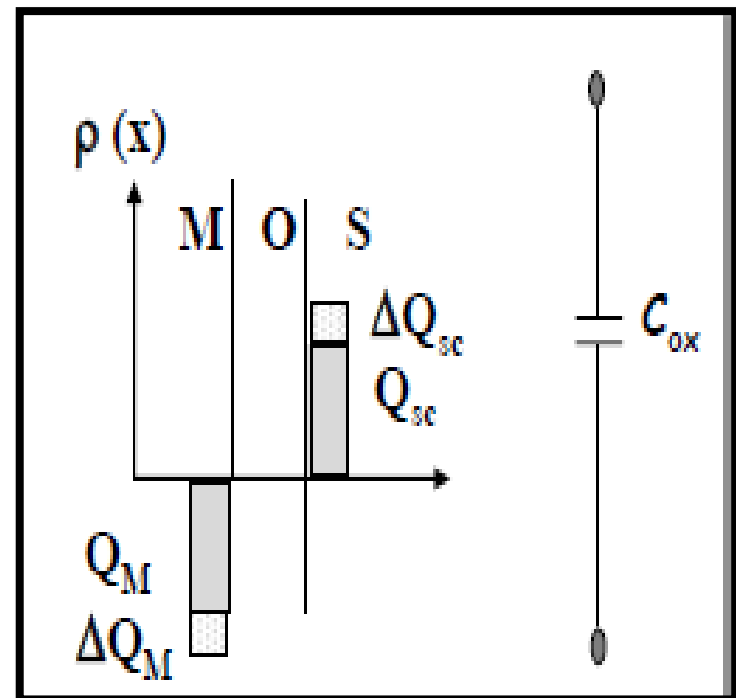
TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

1. Régime d'accumulation

Dans ce régime, la capacité de la structure se réduit à celle de l'isolant.

Elle est indépendante de la tension de polarisation et donc du potentiel de surface.

$$C_A = C_{ox} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

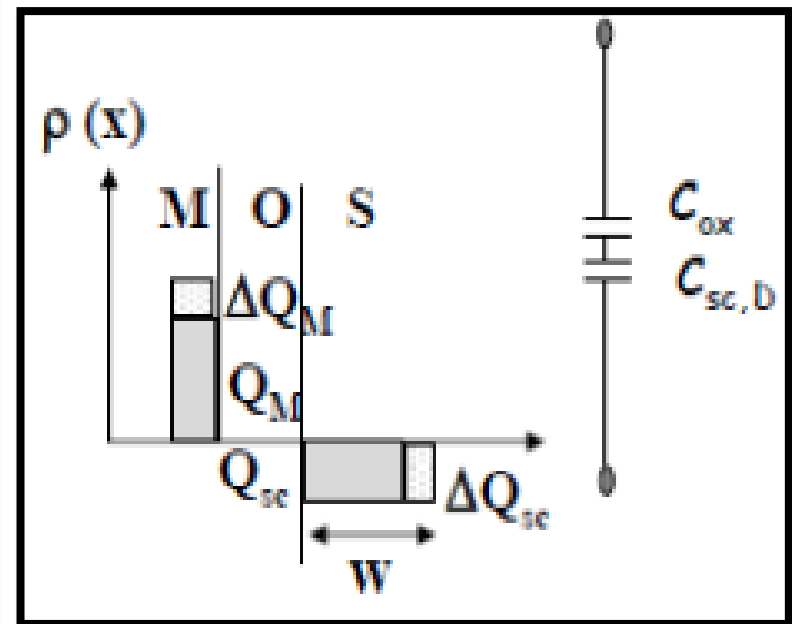
2. Régime de déplétion

Dans ce régime, la capacité de la structure est constituée de 2 capacités en série:

- Capacité de l'isolant;
- Capacité de la ZCE.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{sc,D}}$$

$$C_{sc,D} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{sc}}{w} \quad \text{avec} \quad w = \sqrt{\frac{2 \epsilon_0 \epsilon_{sc}}{q N_A} V_S}$$



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

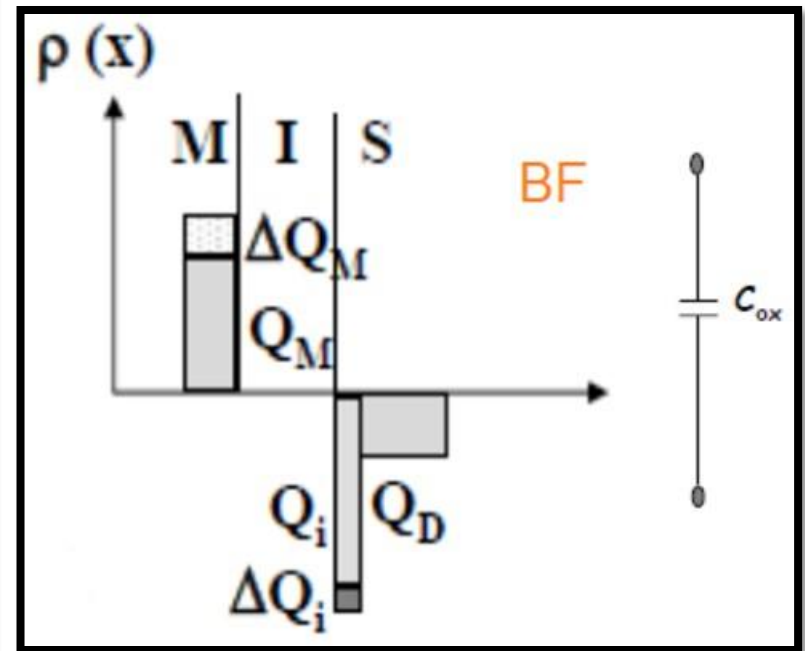
TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

3. Régime d'inversion **BF**

Dans ce régime, la capacité de la structure se réduit à celle de l'isolant.

Elle est indépendante de la tension de polarisation et donc du potentiel de surface.

$$C_{inv, BF} = C_{ox} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ox}}{t_{ox}} \quad \text{BF}$$



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

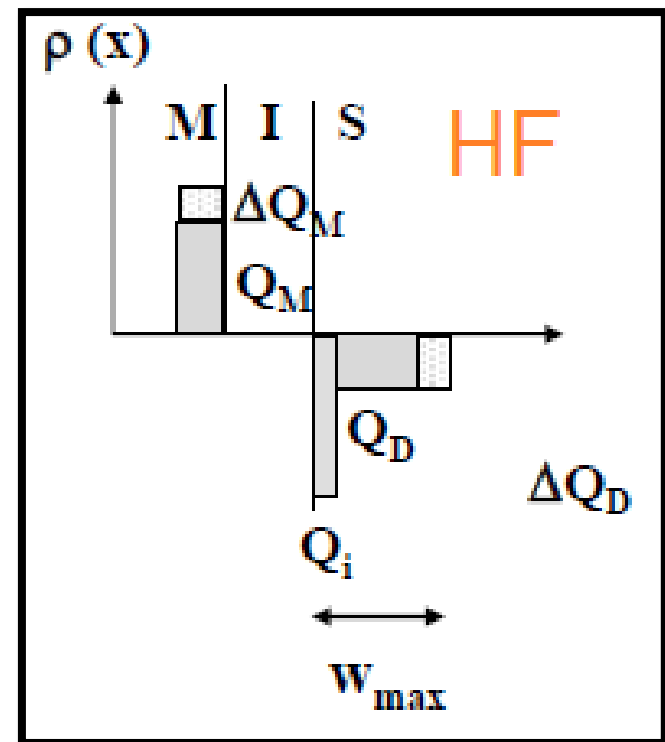
3. Régime d'inversion HF

Dans ce régime, la capacité de la structure se réduit à celle de l'isolant.

Elle est indépendante de la tension de polarisation et donc du potentiel de surface.

$$\frac{1}{C_{inv,HF}} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{sc,D min}} \quad HF$$

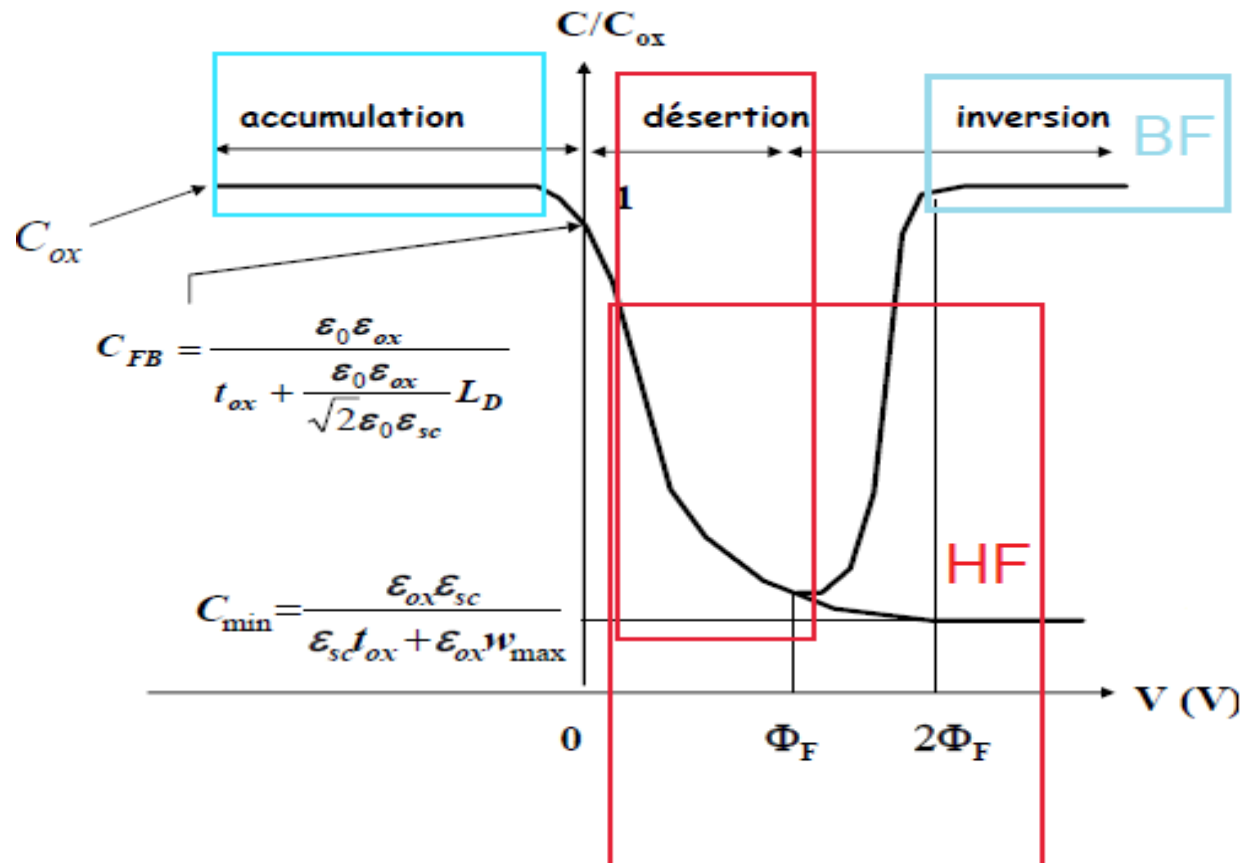
$$C_{sc,D} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{sc}}{w_{max}} \quad \text{avec} \quad w_{max} = \sqrt{\frac{4 \epsilon_0 \epsilon_{sc} kT}{q^2 N_A} \ln \frac{N_A}{n_i}}$$



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

Caractéristique C(V)
d'une structure MOS idéale





MÉTHODES ÉLECTRIQUES
TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

Partie 2: Structure MOS réelle

MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

Structure MOS réelle

Dans ce cas, on va s'affranchir des hypothèses simplificatrices admises pour la structure MOS idéale, c.a.d.:

- ❑ Les travaux de sortie du métal et du semi-conducteur ne sont pas égaux ($\phi_m \neq \phi_{sc}$);
- ❑ Il y a des états à l'interface isolant - semi-conducteur ($N_{ss} \neq 0$);
- ❑ Il y a des charges électriques dans l'isolant ($Q_{ox} \neq 0$).



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

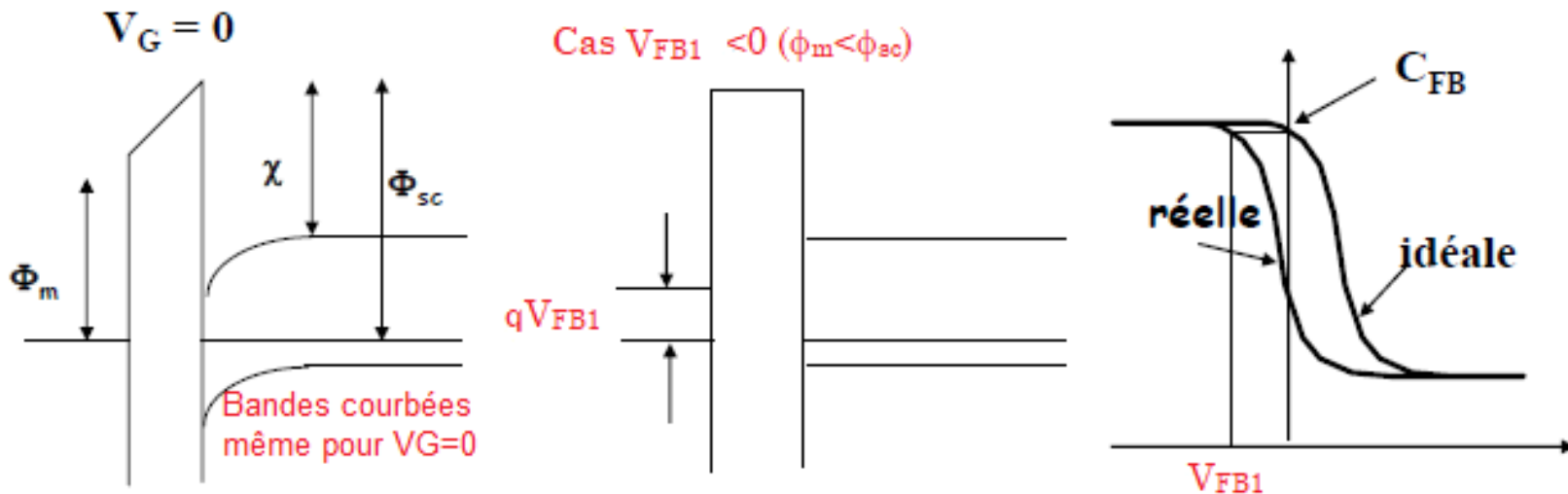
TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

Influence des travaux de sortie

Dans ce cas, il existe un champ électrique dans l'isolant et dans le semi-conducteur au voisinage de l'interface. Pour retrouver une situation de "bandes plates", il faut appliquer au métal une polarisation V_{FB1} afin d'annuler ce champ électrique.

La structure, même en absence de polarisation, sera en régime de désertion ou d'inversion. Pour retrouver la situation de "bandes plates", il faut appliquer au métal une polarisation V_{FB1} (négative pour $(\phi_m < \phi_{sc})$) afin d'annuler le champ électrique dû à la différence des travaux de sortie.

Conséquence: La courbe $C(V)$ est translatée parallèlement à l'axe des tension d'une quantité égale V_{FB1} (le sens du déplacement dépend du signe $(\phi_m - \phi_{sc})$)



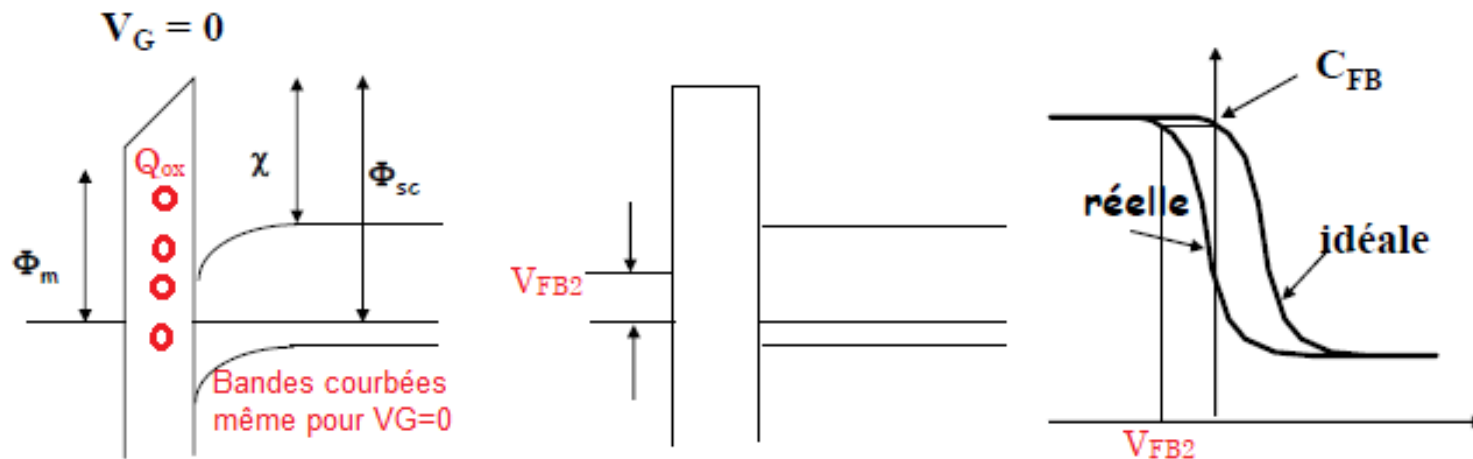
MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

Influence des charges dans l'oxyde

Dans ce cas aussi, les charges qui se trouvent dans l'isolant créent un champ électrique qui va exercer une influence électrostatique sur les porteurs du semi-conducteur. La structure, même en l'absence de polarisation, sera en régime de désertion ou d'inversion. Pour retrouver la situation de "bandes plates", il faut appliquer au métal une polarisation V_{FB2} (négative pour des charges positives) afin d'annuler l'influence électrostatique due aux charges dans l'isolant.

Conséquence: Là aussi, la courbe $C(V)$ est translatée parallèlement à l'axe des tensions d'une quantité égale V_{FB2} (le sens du déplacement dépend du signe des charges)



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

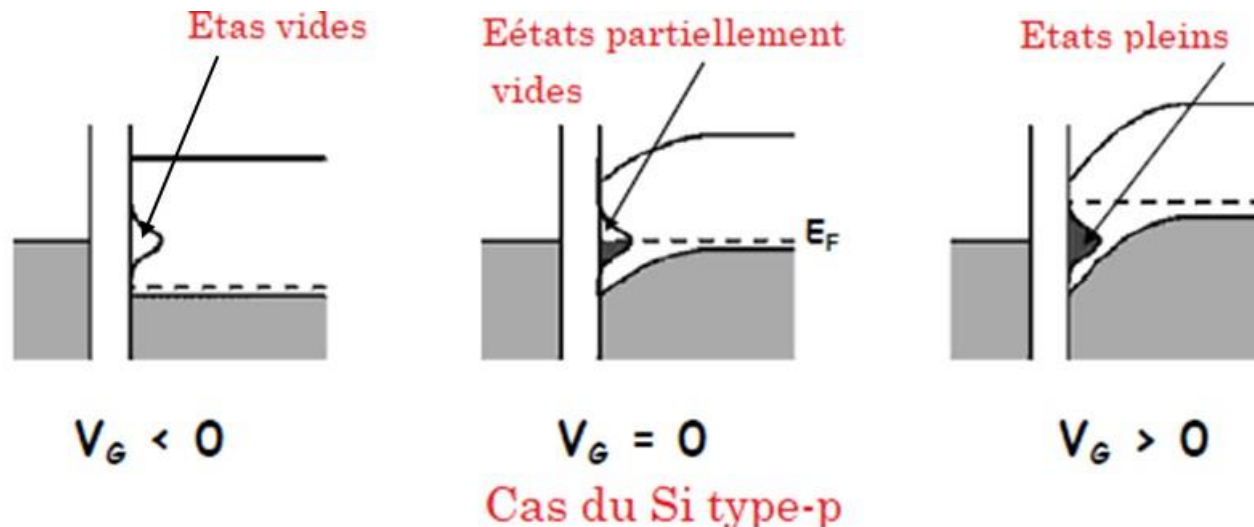
TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

Variation du taux d'occupation des états d'interface

Origine des états d'interface: Ils sont dus aux défauts localisés à l'interface semi-conducteur-isolant et qui introduisent des niveaux d'énergie dans la bande interdite du semi-conducteur.

Règle d'occupation:

- ❑ Tous les états situés au-dessus du niveau de Fermi sont vides.
- ❑ Tous les états situés au-dessous du niveau de Fermi sont pleins.



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

Influence des états d'interface

Bilan des charges:

$$Q_m = Q_{sc} + Q_{ss}$$

Q_m : Charge sur la grille,

Q_{sc} : Charge ZCE,

Q_{ss} : Charge piégée sur les états

Répartition du potentiel appliqué: $V_G = V_I + V_S$

Ce qui donne:

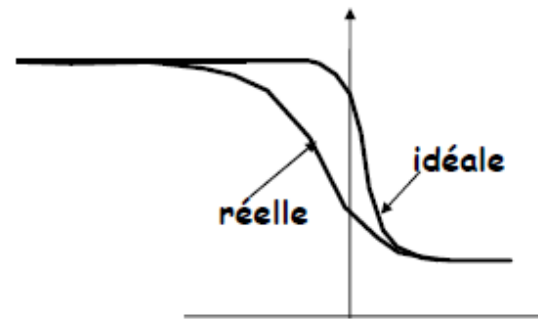
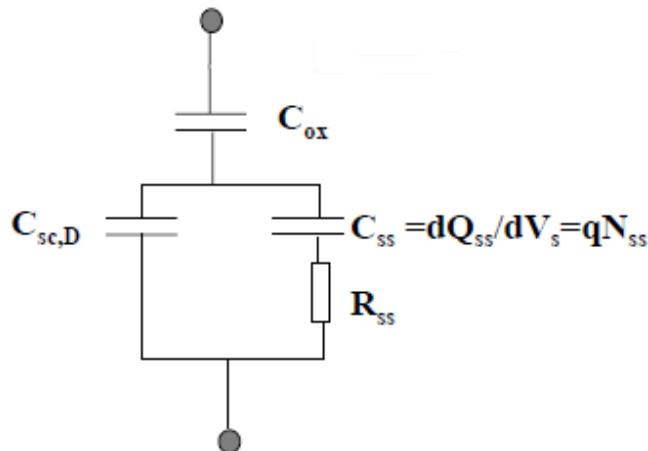
$$V_G = \frac{Q_{sc} + Q_{ss}}{C_{ox}} + V_S$$



$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{dV_S}{dQ_{sc} + dQ_{ss}} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{sc,D} + C_{ss}}$$

Conséquence:

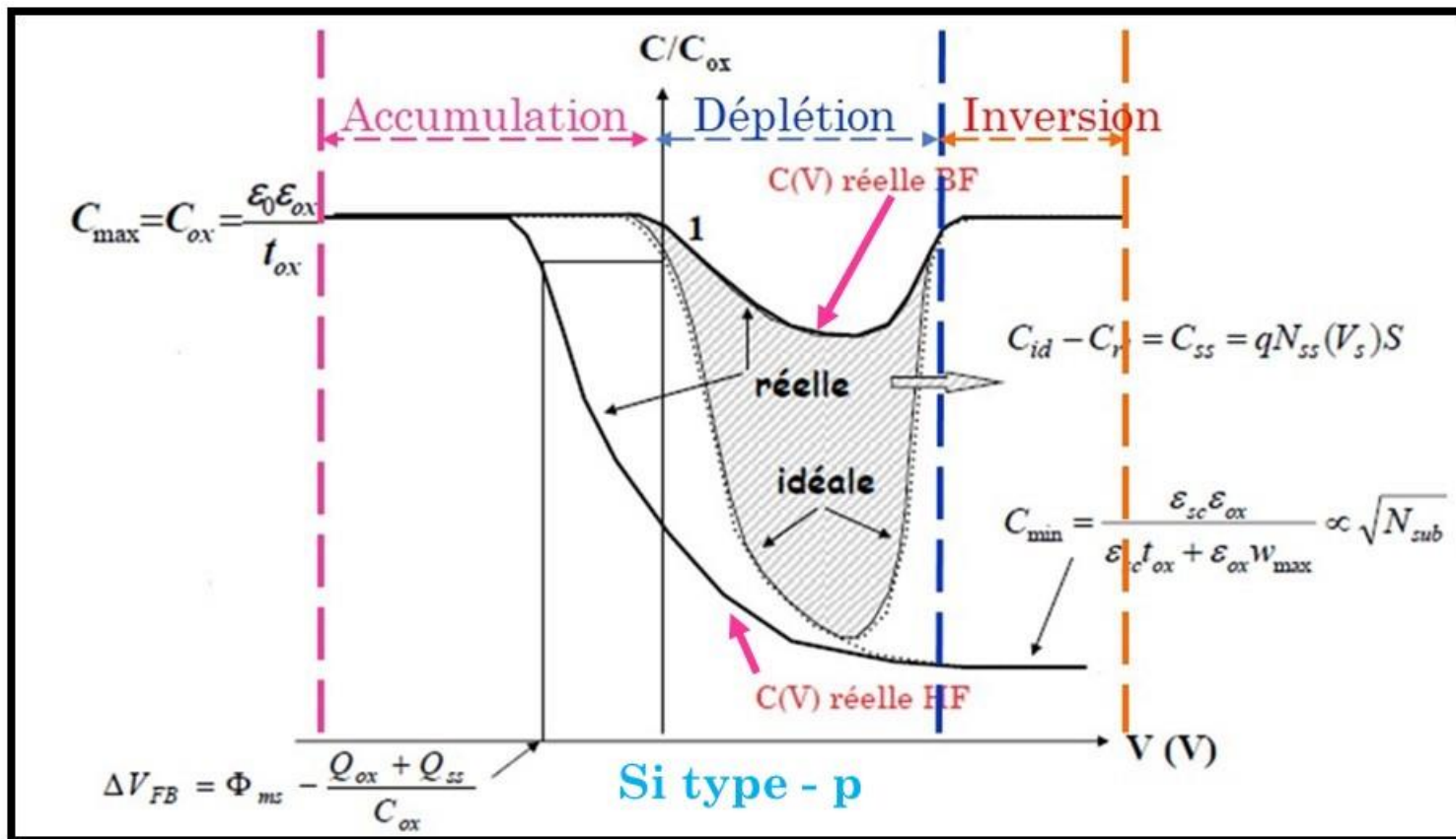
La courbe $C(V)$ est déformée; elle subit une dilatation selon l'axe des tensions.



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

Caractéristique C(V) d'une structure MOS





MÉTHODES ÉLECTRIQUES
TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

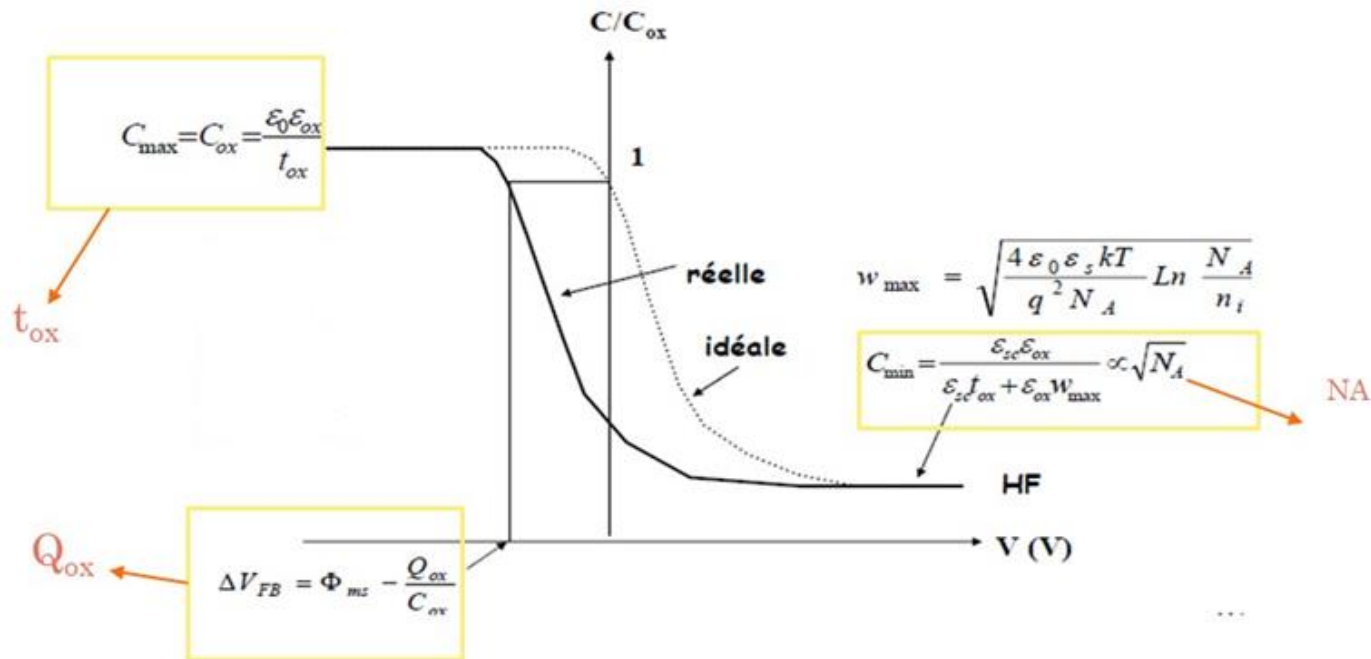
**Partie 3: Exploitation de la
caractéristique $C(V)$ réelle HF**

MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

Détermination de t_{ox} , Dopage N et Q_{ox}

La représentation graphique de $C(V)$ mesurée à **HF** (1MHz) et $C(V)$ idéale à **HF** permet la détermination des paramètres: t_{ox} , Dopage N et Q_{ox} à partir de C_{max} , C_{min} et ΔV_{FB} comme il est indiqué sur la courbe ci-dessous.

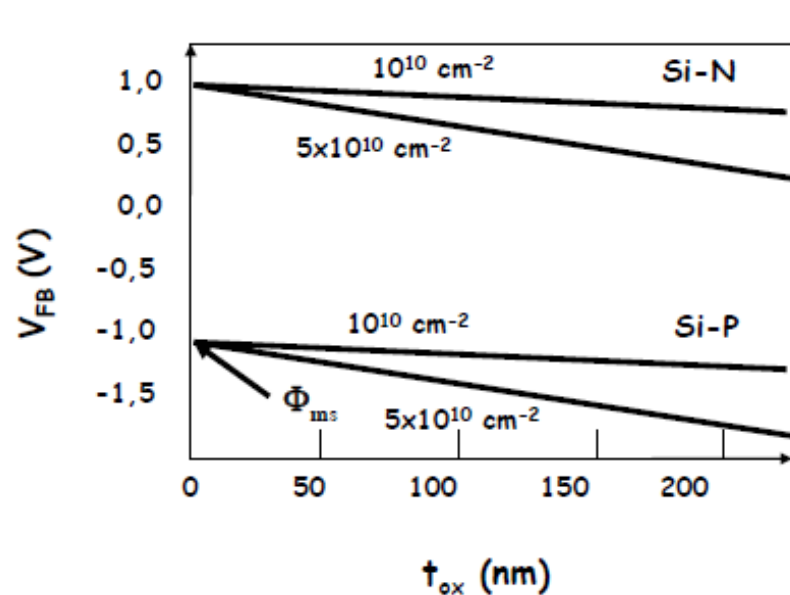


MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

Extraction de la différence des travaux de sortie ϕ_{ms}

L'extraction de la différence des travaux de sortie se fait à partir de la représentation graphique de $V_{FB}(t_{OX})$ donnée par l'expression:



$$V_{FB} = \Phi_{ms} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} = \Phi_{ms} - \frac{t_{ox} Q_{ox}}{\epsilon_0 \epsilon_{ox}}$$



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

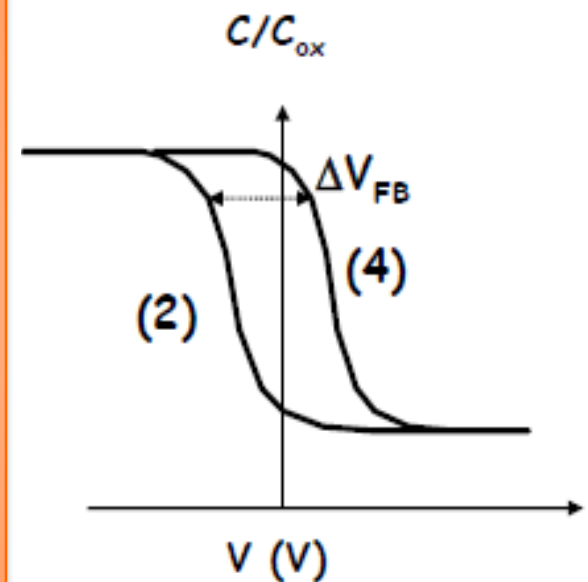
Extraction des charges mobiles dans l'oxyde

Pour extraire les charges mobiles dans l'oxyde on procède comme suit:

- (1). Elever T de la structure à $T= 150^{\circ}\text{C} - 250^{\circ}\text{C}$ et la soumettre à $V>0 \rightarrow E \sim 10^6 \text{ V/cm}$, $t=5-10 \text{ mn}$;
- (2). Baisser T de la structure à $T= 25^{\circ}\text{C}$ et relever $C(V)$;
- (3). Elever T de la structure à $T= 150^{\circ}\text{C} - 250^{\circ}\text{C}$ et la soumettre à $V<0 \rightarrow E \sim 10^6 \text{ V/cm}$, $t=5-10 \text{ mn}$;
- (4). Baisser T de la structure à $T= 25^{\circ}\text{C}$ et relever $C(V)$.

Représenter $C(V)$ des étapes (2) et (4) sur un même graphe et déduire Q_{mob} de l'expression:

$$\Delta V_{\text{FB}} = - Q_{\text{mob}} / C_{\text{ox}}$$



MÉTHODES ÉLECTRIQUES

TECHNIQUE DE LA DIODE MIS

Extraction de la densité d'états d'interface par la technique de Terman

Etape 1: Mesurer C_{HF}

Etape 2: Déterminer C_{SC} à partir de la relation $C_{HF} = \frac{C_{ox} C_{SC}}{C_{ox} + C_{SC}}$

Etape 3: Calculer ψ_s théoriquement et déterminer la relation ψ_s (V)

Etape 4: Déterminer la densité d'états d'interface N_{SS} en utilisant l'expression:

$$N_{SS} = \frac{C_{ox}}{q^2} \left[\left(\frac{d\psi_s}{dV} \right)^{-1} - 1 \right] - \frac{C_{SC}}{q^2}$$

