

Résumé de cours M1 Microélectronique

Module : Physique des composants semi-conducteurs 1

Prof. Abdelhamid BENHAYA

Directeur du Laboratoire d'Electronique Avancée

Responsable Salle Blanche

Département d'Electronique

Faculté de Technologie

Université Batna 2

<https://youtu.be/ZJsE0UN7v1E>

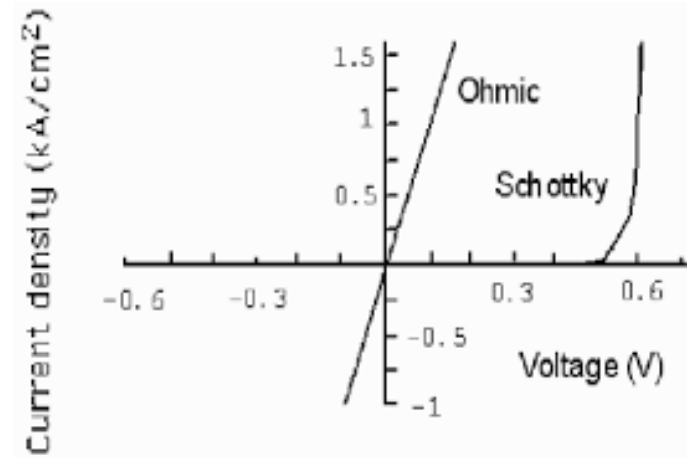
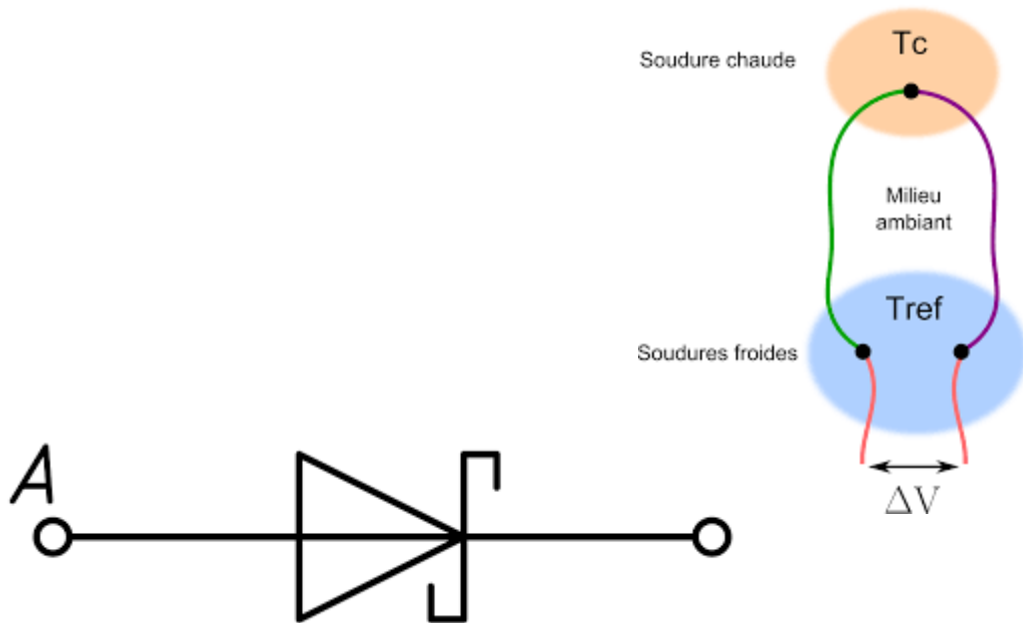
Domaines d'intérêt:

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



Structures

Métal-Métal
et
Métal-Semi-conducteur

BIBLIOGRAPHIE

Langue Anglaise

1. Marius Grundmann, The Physics of Semiconductors, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
2. S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, JOHN WILEY & SONS, 2007.
3. <http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/contents.htm>

Langue Française

1. A. Vapaille et R. Castagné, Dispositifs et circuits semi-conducteurs, Physique et technologie, Dunod, 1987.
2. CHRISTIAN ET HELENE NGÖ, Introduction à la physique des semi-conducteurs, Dunod, 1998.
3. H. MATHIEU, physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, Dunod, 2001.
4. <https://www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/>
5. <http://koeniguer.perso.cegetel.net/ips/ips.html>

Plan de l'exposé

La jonction métal-métal;

- Définition de grandeurs de base;
- Effets thermoélectriques.

La jonction métal-semi-conducteur (ou diode Schottky) à l'équilibre.

La diode Schottky polarisée.

- Courants dans la jonction métal-semi-conducteur;
- Comparaison Jonction PN - Diode Schottky.

Différents types de contacts.

- Contact Ohmique;
- Contact tunnel;
- Contact recuit ou allié.

Mesure de la résistance de contact par la technique TLM.

Contact Métal-Métal et Métal-Semi-conducteur

1. La jonction métal-métal

Niveau du vide

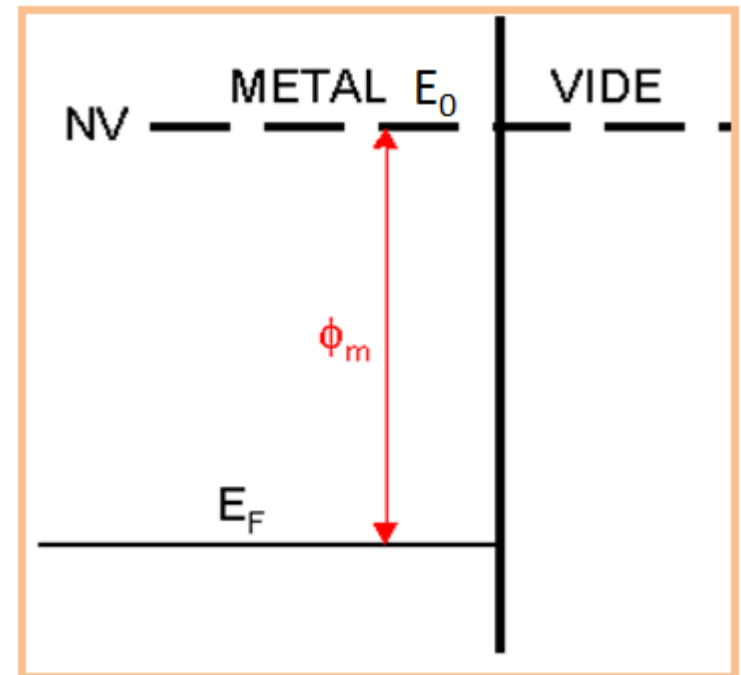
On appelle **Niveau du Vide** (Vacuum level), noté **NV**, l'énergie d'un électron **extrait du matériau** et **sans vitesse** initiale.

C'est l'énergie potentielle de l'électron dans le vide au voisinage du matériau étudié

Travail (potentiel) de sortie (extraction)

On appelle **travail de sortie** (**work function**), l'énergie qu'il faut fournir à un électron situé au **niveau de Fermi** E_F pour l'arracher du métal et l'amener au **niveau du vide** NV.

$$\phi_m = NV - E_F = E_0 - E_F$$

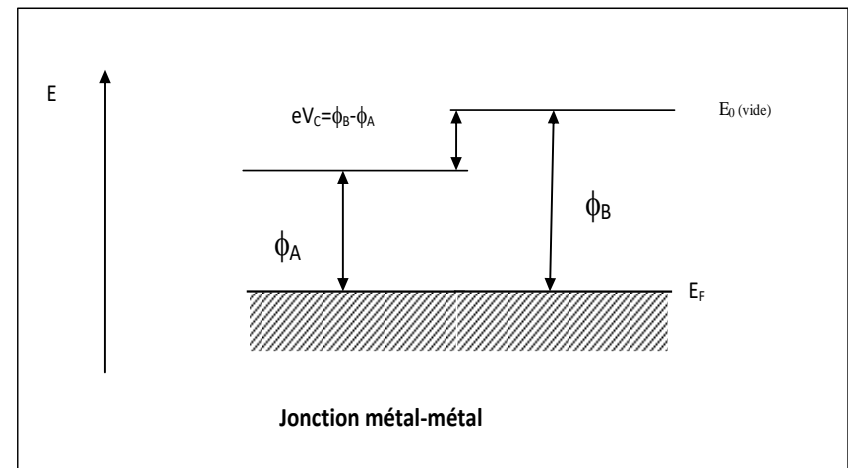
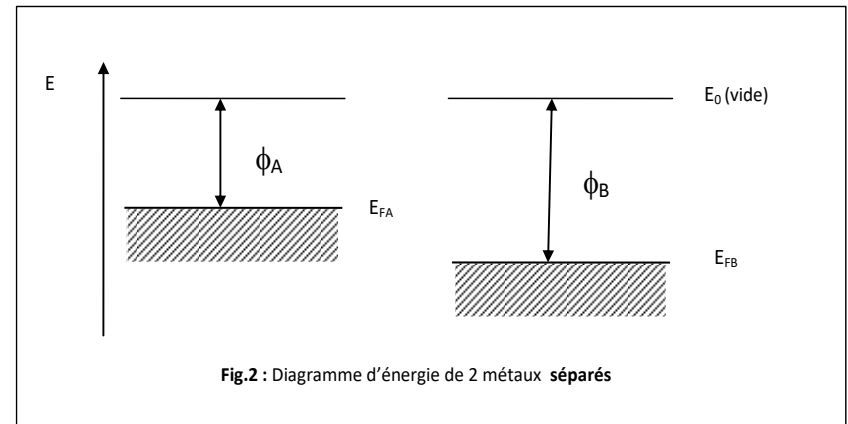


Contact Métal-Métal et Métal-Semi-conducteur

1. La jonction métal-métal

Potentiel de contact

- Avant contact, les niveaux du vide sont alignés
- Après la mise en contact, les niveaux de Fermi s'alignent
- Pour atteindre cet équilibre, des électrons du métal A vont passer vers le métal B. Par conséquent, l'interface du côté (A) est chargée positivement tandis que l'interface du côté (B) est chargée négativement.
- A l'équilibre ($E_{FA} = E_{FB}$),
- Il s'établit donc un potentiel de contact : $eV_C = \phi_B - \phi_A$



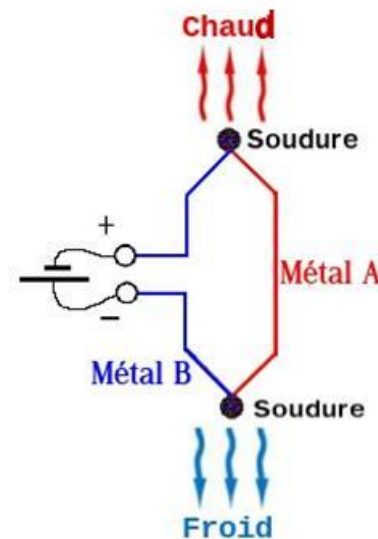
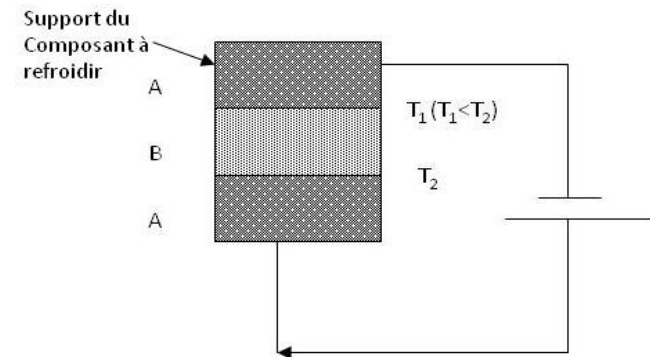
Contact Métal-Métal et Métal-Semi-conducteur

1. La jonction métal-métal

Effets thermoélectriques

Effet Peltier :

- Si on considère une association de métaux du type A-B-A à travers laquelle on fait circuler un courant I . On observe que la température d'une des jonctions augmente alors que celle de l'autre diminue ; c'est l'effet Peltier.
- **Application** : L'effet Peltier est utilisé, entre autres, pour refroidir des composants électroniques.



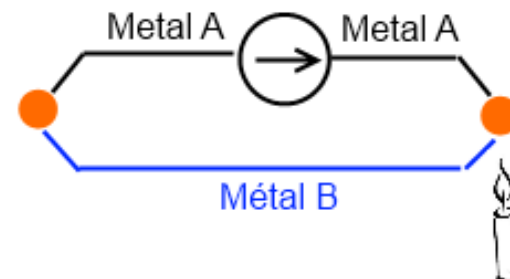
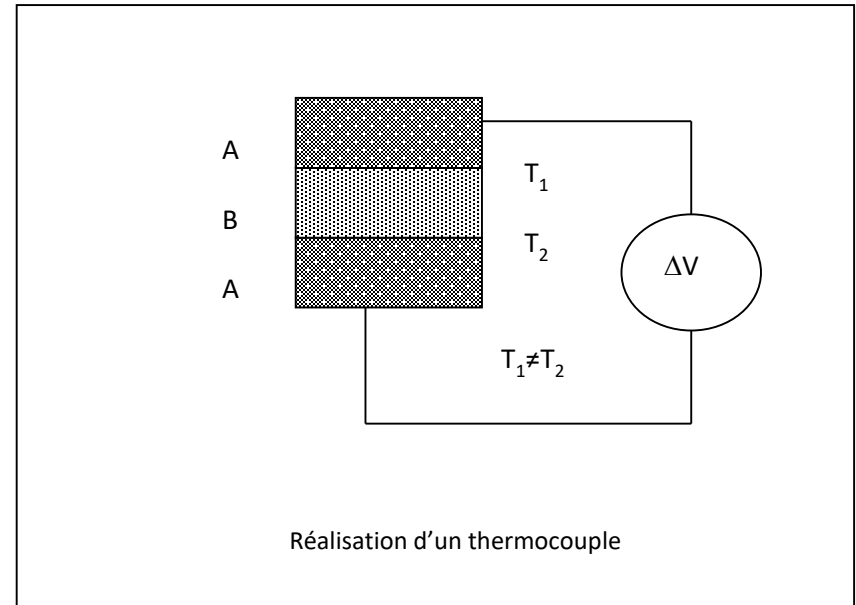
Refroidissement par effet Peltier

Contact Métal-Métal et Métal-Semi-conducteur

1. La jonction métal-métal

Effets thermoélectriques

- **Effet Seebeck** : Si on maintient les deux jonctions de l'association A-B-A à des températures différentes, on observe une d.d.p. aux bornes du dispositif; c'est l'effet Seebeck.
- **Application** : L'effet Seebeck est à la base du fonctionnement des thermocouples; des dispositifs qui permettent la mesure de la température d'un milieu.



Contact Métal-Métal et Métal-Semi-conducteur

2. La jonction métal-semi-conducteur

Contact Ohmique ou effet redresseur?

- lorsqu'on met en contact un métal et un semi-conducteur, les deux niveaux de Fermi s'équilibrent (s'alignent) et ainsi, deux cas peuvent se présenter selon la valeur relative des travaux de sortie du métal et du semi-conducteur.
- En effet, si on considère, par exemple, le cas d'un semi-conducteur de type n et un métal dont les travaux de sortie sont respectivement ϕ_s et ϕ_m , on peut avoir :
 - Un contact ohmique si $\phi_m < \phi_s$ (Dopage $> 10^{18} \text{ cm}^{-3}$);
 - Un effet redresseur analogue à celui observé dans le cas de la jonction pn si $\phi_m > \phi_s$ (Dopage $< 10^{17} \text{ cm}^{-3}$); c'est la diode Schottky.

Remarque: Dans le cas d'un semi-conducteur de type p, le contact ohmique est obtenu lorsque $\phi_m > \phi_s$ et la diode Schottky (effet redresseur) lorsque $\phi_m < \phi_s$.

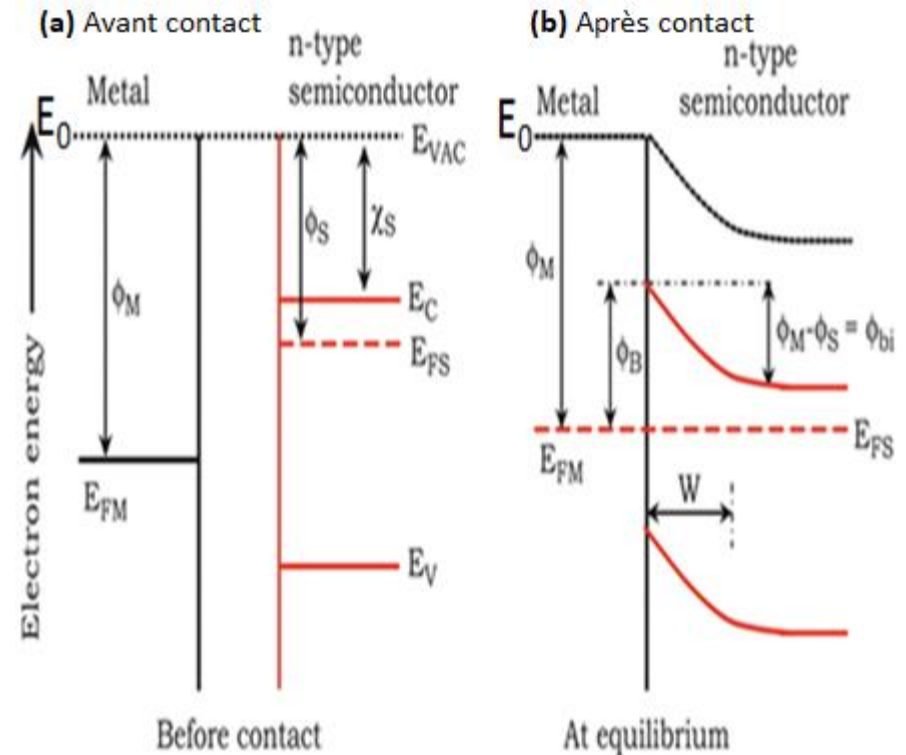
Contact Métal-Métal et Métal-Semi-conducteur

2. La jonction métal-semi-conducteur

Diode Schottky

Diode Schottky à l'équilibre

- Après la mise en contact, les niveaux de Fermi s'équilibrent ($E_{Fm} = E_{Fs}$) et on obtient le diagramme d'énergie illustré par la figure ci-contre
- les grandeurs qui y apparaissent sont définies comme suit :
 - Affinité électronique du semi-conducteur : $\chi = E_0 - E_C$
 - Travail d'extraction du semi-conducteur : $\phi_s = E_0 - E_{Fs}$
 - Travail d'extraction du métal : $\phi_m = E_0 - E_{Fm}$



Contact Métal-Métal et Métal-Semi-conducteur

2. La jonction métal-semi-conducteur

Diode Schottky

Développement des barrières de potentiel :

• Lors de la mise en contact du métal et du semi-conducteur, des électrons (pour notre cas) passent du semi-conducteur vers le métal.

• A l'interface, les bandes du semi-conducteur se courbent vers le haut d'une quantité égale à :

$$V_d = \phi_{bi} = \phi_M - \phi_S$$

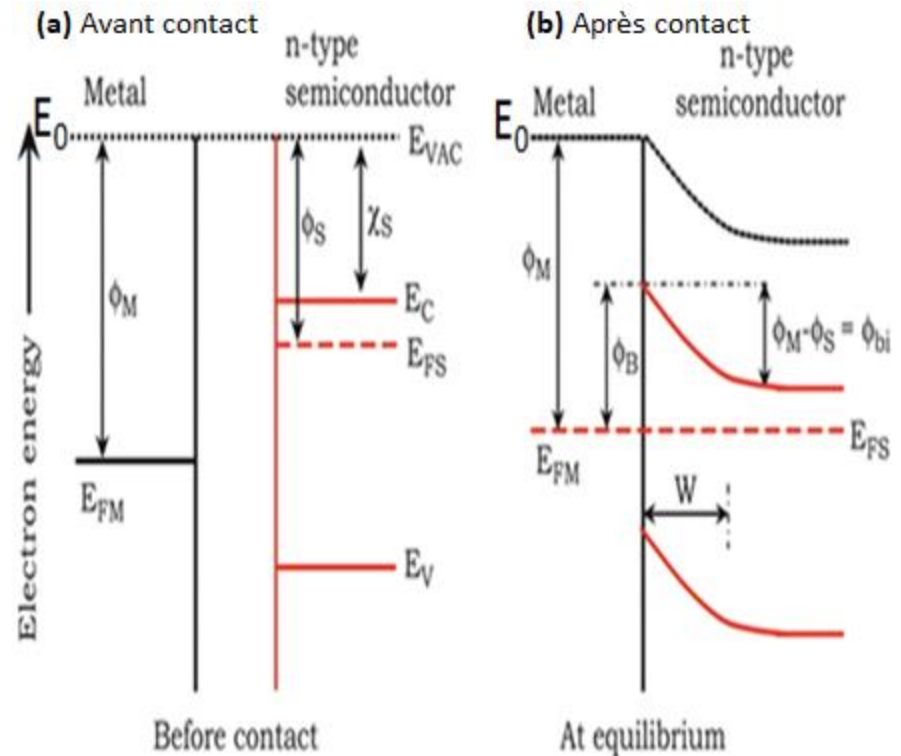
C'est la valeur de la hauteur de barrière qui s'établit du côté du semi-conducteur (la barrière que doit surmonter les électrons du bas de la bande de conduction du semi-conducteur).

• La barrière du côté métal est égale à :

$$\phi_B = \phi_M - \chi_S$$

• **Remarque :** Dans le cas d'un semi-conducteur de type p, la barrière du côté métal devient :

$$\phi_B = E_g - (\phi_M - \chi_S)$$



Contact Métal-Métal et Métal-Semi-conducteur

2. La jonction métal-semi-conducteur

Le travail d'extraction de certains métaux et les barrières de potentiel qui résultent de leur contact avec les semi-conducteurs les plus courants.

N.B.: Les barrières mesurées diffèrent souvent de celles calculées selon les expressions données ci-dessus à cause des phénomènes complexes ayant lieu à l'interface (états de surface, procédures de nettoyage,...)

	Ag	Al	Au	Cr	Ni	Pt	W
Φ_M (in vacuum)	4.3	4.25	4.8	4.5	4.5	5.3	4.6
n-Ge	0.54	0.48	0.59		0.49		0.48
p-Ge	0.5		0.3				
n-Si	0.78	0.72	0.8	0.61	0.61	0.9	0.67
p-Si	0.54	0.58	0.34	0.5	0.51		0.45
n-GaAs	0.88	0.8	0.9			0.84	0.8
p-GaAs	0.63		0.42				

Contact Métal-Métal et Métal-Semi-conducteur

2. La jonction métal-semi-conducteur

Measured Schottky Barrier heights for electrons on N-type Silicon $\Phi_B | N$ and the measured Schottky Barrier heights for holes on P-type Silicon $\Phi_B | P$.

Metal	Mg	Ti	Cr	W	Mo	Pd	Au	Pt
$\Phi_M(\text{eV})$	3.7	4.3	4.5	4.6	4.6	5.1	5.1	5.7
$\Phi_B N(\text{eV})$	0.4	0.5	0.61	0.67	0.68	0.77	0.8	0.9
$\Phi_B P(\text{eV})$	-	0.61	0.50	-	0.42	-	0.3	-

Contact Métal-Métal et Métal-Semi-conducteur

2. La jonction métal-semi-conducteur

Zone de charge d'espace

1. Paramètre de la zone de charge d'espace

1.1. Densité de charge d'espace

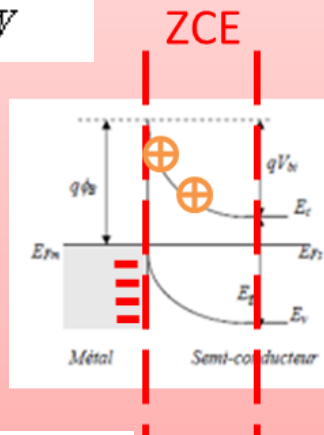
$$\rho(x) = \begin{cases} eN_d & 0 < x < W \\ 0 & x > W \end{cases}$$

1.2. Equation de Poisson

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -e \frac{N_d}{\epsilon_s}$$

1.3. Champ électrique

$$E(x) = -\frac{dV}{dx} = \frac{eN_d}{\epsilon_s} (x - W)$$



1.4. Potentiel

$$V(x) = -\frac{eN_d}{\epsilon_s} \left(\frac{x^2}{2} - Wx \right) = \frac{eN_d}{\epsilon_s} \left(Wx - \frac{x^2}{2} \right)$$

1.5. Tension de diffusion

$$V_d = V(x=W) - V(x=0) = -\frac{eN_d}{\epsilon_s} \left(\frac{W^2}{2} - W^2 \right) = \frac{eN_d}{2\epsilon_s} W^2$$

1.6. Largeur de la zone de charge d'espace

$$W = \left(\frac{2\epsilon_s}{eN_d} V_d \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{2\epsilon_s}{eN_d} (\phi_m - \phi_s) \right)^{\frac{1}{2}}$$

Contact Métal-Métal et Métal-Semi-conducteur

2. La jonction métal-semi-conducteur

Diode Schottky polarisée

1. Barrière de potentiel

- Pour une **polarisation positive du métal** par rapport **au semi-conducteur de type n**, la barrière qui s'oppose au passage des électrons du semi-conducteur vers le métal diminue : $eV_d = \phi_m - \phi_{sc} - eV$
- Par contre la barrière qui s'oppose au passage des électrons du métal vers le semi-conducteur reste inchangée car il n'y a pas de chute de potentiel dans le métal
- Pour une **polarisation positive du semi-conducteur de type n** par rapport **au métal**, la barrière augmente.

$$eV_d = \phi_m - \phi_{sc} + eV$$

2. Capacité différentielle

Dans le cas où la structure métal - semi-conducteur (n) est polarisée en direct avec une tension V, la largeur de la zone de charge d'espace devient :

$$W = \left(\frac{2\varepsilon_s}{eN_d} (V_d - V) \right)^{\frac{1}{2}}$$

La charge d'espace (charge par unité de surface) est donnée par :

$$Q_m = -Q_{sc} = eN_d W = (2\varepsilon_s e N_d (V_d - V))^{\frac{1}{2}}$$

Par conséquent, la capacité différentielle (capacité par unité de surface) est donnée par :

$$C(V) = \left| \frac{dQ}{dV} \right| = \left(\frac{\varepsilon_s e N_d}{2} \right)^{\frac{1}{2}} (V_d - V)^{-\frac{1}{2}} = \frac{\varepsilon_s}{W}$$

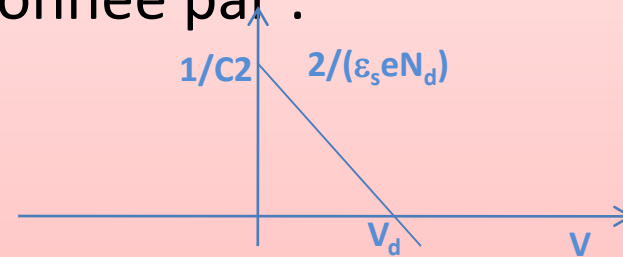
Contact Métal-Métal et Métal-Semi-conducteur

2. La jonction métal-semi-conducteur

Remarque très importante

- Il résulte de l'équation précédente que **l'inverse du carré de la capacité différentielle** est donnée par :

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2}{\epsilon_s e N_d} (V_d - V)$$



- Il est clair que la courbe $1/C^2 = f(V)$ est une droite dont la pente permet de déterminer N_d et dont l'abscisse à l'origine permet de déterminer la hauteur de la barrière V_d .

N.B. Dans le cas où la courbe $1/C^2 = f(V)$ **n'est plus une droite**, cela veut dire que **le dopage n'est pas uniforme**.

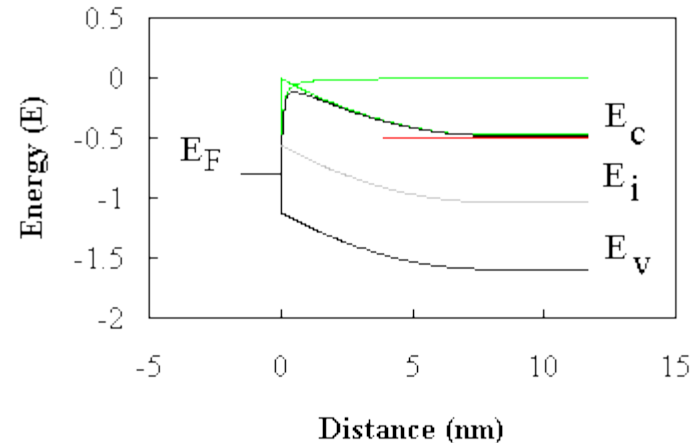
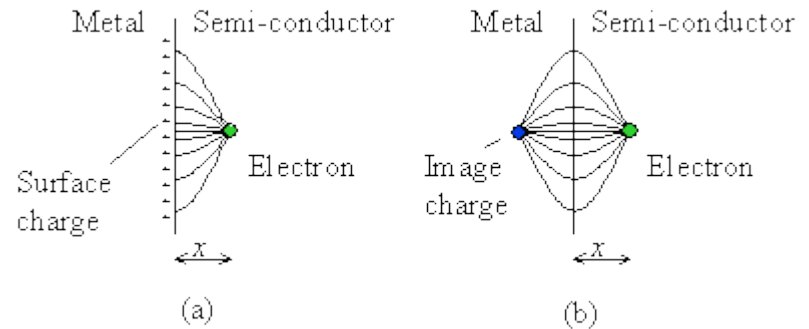
Contact Métal-Métal et Métal-Semi-conducteur

2. La jonction métal-semi-conducteur

Réduction de la barrière de Schottky (effet de la charge image)

Lorsqu'un **électron** du semi-conducteur s'approche de **l'interface métal-semi-conducteur**, il induit **une charge image** dans **le métal**; ce qui a pour effet une **réduction de la barrière de potentiel** d'une quantité donnée par l'expression:

$$\Delta\phi_B = \left| \frac{e^3 N_D (\text{ou } N_A) (V_D - V)}{8\pi^2 \epsilon_{SC}^3 \epsilon_0^3} \right|^{\frac{1}{4}}$$



Contact Métal-Métal et Métal-Semi-conducteur

2. La jonction métal-semi-conducteur

Courants dans la jonction métal-semi-conducteur

1. Courant de diffusion

$$J_n = \frac{q^2 D_n N_c}{V_t} \sqrt{\frac{2q(\phi - V_a) N_d}{\epsilon}} \exp\left(-\frac{\phi_B}{V_t}\right) \left[\exp\left(\frac{V_a}{V_t}\right) - 1\right]$$

$$J_n = q \mu_n \epsilon_{\max} N_c \exp\left(-\frac{\phi_B}{V_t}\right) \left[\exp\left(\frac{V_a}{V_t}\right) - 1\right]$$

1. Courant thermo-ionique

$$J_{MS} = A^* T^2 e^{-\phi_B / V_t} (e^{V_a / V_t} - 1)$$

$$A^* = \frac{4 \pi q m^* k^2}{h^3}$$

3. Courant tunnel

$$J_n = q v_R n \Theta$$

$$\Theta = \exp\left(-\frac{4}{3} \frac{\sqrt{2qm^*}}{\hbar} \frac{\phi_B^{3/2}}{\epsilon}\right)$$

$$\epsilon = \phi_B / L$$

Contact Métal-Métal et Métal-Semi-conducteur

2. La jonction métal-semi-conducteur

Comparaison Jonction PN Diode Schottky

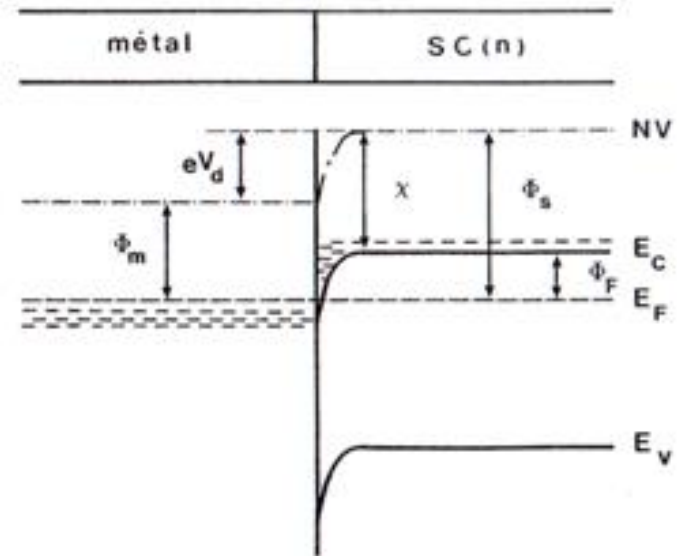
Grandeur	Jonction pn	Diode Schottky
Courant inverse	Porteurs minoritaires qui diffusent à travers la zone de déplétion, donc une forte dépendance de T.	Porteurs majoritaires, en provenance du métal, qui franchissent la barrière
Courant direct	Injection de porteurs minoritaires venant des zones p et n.	Injection de porteurs majoritaires en provenance du semi-conducteur
Tension de fonctionnement direct	Importante	Faible
Commutation	Moins rapide	Rapide
Tension de claquage	Importante	Faible

Contact Métal-Métal et Métal-Semi-conducteur

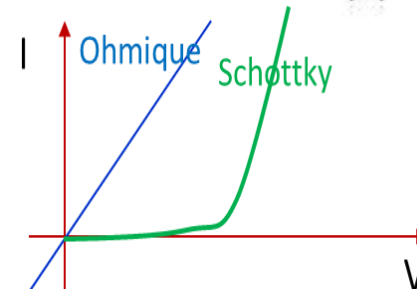
2. La jonction métal-semi-conducteur

Contact Ohmique

- Si on dépose sur un semi-conducteur de **type n** un métal dont le travail d'extraction vérifie l'inéquation : $\phi_m < \phi_s$.
- A l'équilibre, les niveaux de Fermi s'égalisent et il n'y a pas de barrière empêchant les électrons de passer dans les deux directions (Voir Figure). On dit, dans ce cas, qu'on a un contact Ohmique.
- Pour avoir un bon contact Ohmique, on élabore, à la surface d'un semi-conducteur de type n, **une fine couche fortement dopée n^+** sur laquelle on dépose un métal. Le rôle de cette couche fine est de **réduire la largeur de la zone de déplétion** et permet aux électrons de **passer par effet Tunnel**.



Contact métal - semi-conducteur (n) avec $\phi_m < \phi_s$



Contact Métal-Métal et Métal-Semi-conducteur

2. La jonction métal-semi-conducteur

Types de contacts

- **Contact ohmique**

- Pour un S/C type n: $\phi_m \leq \chi_{sc}$
- Pour un S/C type p: $\phi_m \geq \chi_{sc} + E_g$

N.B. Problème pour les S/C à grand E_g (SiC; GaN), puisque la plupart des métaux ont un $\phi_m < 5\text{eV}$ et que χ pour la plupart des S/C $> 4\text{eV}$.

- **Contact Tunnel**

-Réduire l'extension de la barrière par un **fort dopage** $> 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

- **Contact recuit ou allié**

-Dans le cas du silicium, par exemple, faire **un recuit** pour l'aluminium déposé **vers 475°C** et sous une **atmosphère réductrice** (20:1 N_2/H_2) , améliore la qualité du contact.

Contact Métal-Métal et Métal-Semi-conducteur

2. La jonction métal-semi-conducteur

Contacts pour les semi-conducteurs composés

- Il est difficile de trouver un métal avec le bon travail de sortie afin de réaliser un contact ohmique.
- La solution consiste à essayer d'améliorer la qualité du contact Tunnel en procédant comme suit:
 - Pour les semi-conducteurs de type n, il est conseillé d'ajouter au métal des dopants comme le germanium (Ge);
 - Pour les semi-conducteurs de type p, il est par contre recommandé d'ajouter au métal des dopants comme le zinc(Zn);
 - Faire un recuit dans une ambiance de gaz de formage pendant 10 min aide les dopants à s'allier au semi-conducteur en formant une région très dopée et contribuer ainsi à l'amélioration de la conduction par effet Tunnel.

Contact Métal-Métal et Métal-Semi-conducteur

2. La jonction métal-semi-conducteur

Schéma équivalent d'un contact métal semi-conducteur

Le courant dans un dispositif à base d'un matériau semi-conducteur, circule entre 2 contacts métalliques comme il est illustré par la figure (a).

Le courant rencontre:

▪ La **résistance de contact** donnée par:

$$R_C = \frac{\rho_c}{LW}$$

▪ La **résistance du semi-conducteur** donnée par:

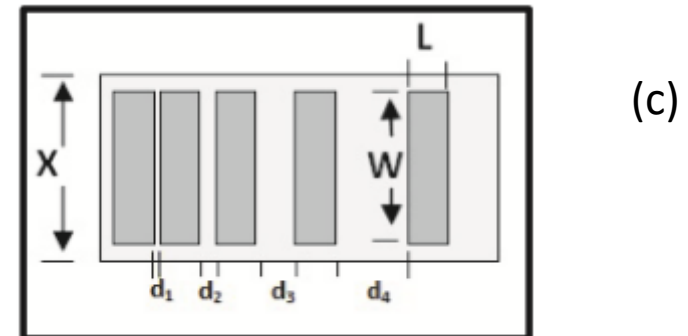
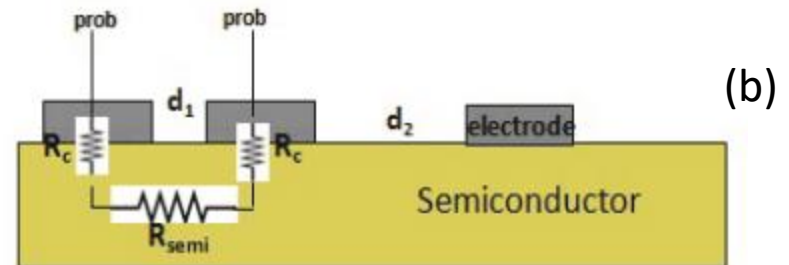
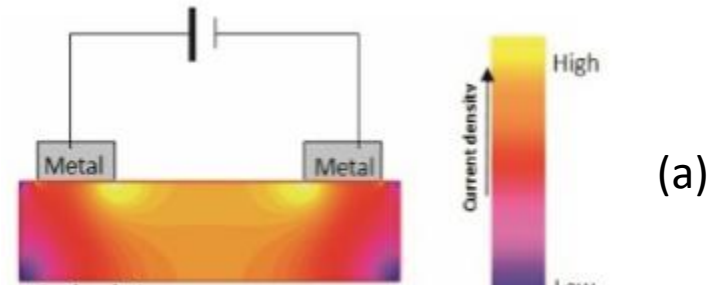
$$R_{sem} = R_s \frac{L}{W}$$

Avec:

• ρ_c : est la **résistivité de contact** de l'interface métal – semi-conducteur en $\Omega \cdot \text{cm}^2$

• R_s : est la **résistance carrée** du **semi-conducteur** en Ω/\square

• **L** et **W** sont respectivement **la longueur** et **la largeur** du contact



Contact Métal-Métal et Métal-Semi-conducteur

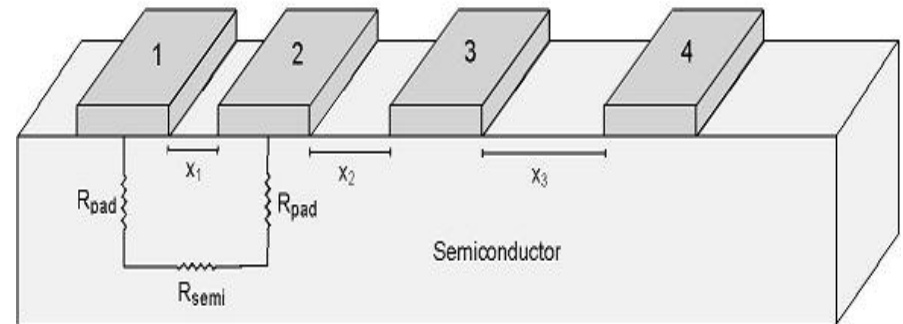
2. La jonction métal-semi-conducteur

Méthode de mesure

Etape 1:

la première étape de mesure de la résistance d'une jonction métal-semi-conducteur consiste à **déposer le motif métal** sur le semi-conducteur de sorte à **obtenir beaucoup de plots identiques** situés à des **distances variables**.

Faire **un recuit** selon votre recette spécifique.



$$R_T = \frac{V}{I} = 2R_c + R_{semi} = 2R_c + R_{sh} \frac{d}{W}$$

Contact Métal-Métal et Métal-Semi-conducteur

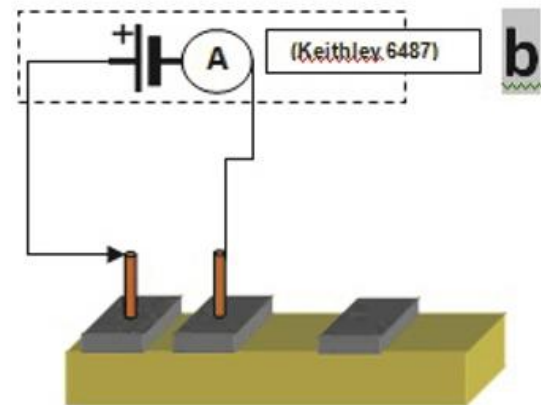
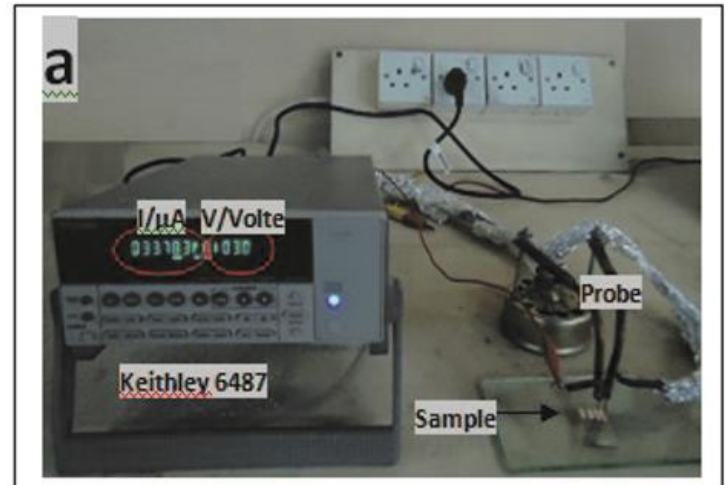
2. La jonction métal-semi-conducteur

Etape2:

Les mesures nécessaires consistent simplement à **déterminer la caractéristique I(V)**

Appliquer **une tension** entre **plusieurs paires** de contacts adjacents dans une rangée, et **mesurer le courant**.

Finalement **calculer la résistance** entre chaque paire de contacts en utilisant la loi d'ohm ($R = V / I$).



Contact Métal-Métal et Métal-Semi-conducteur

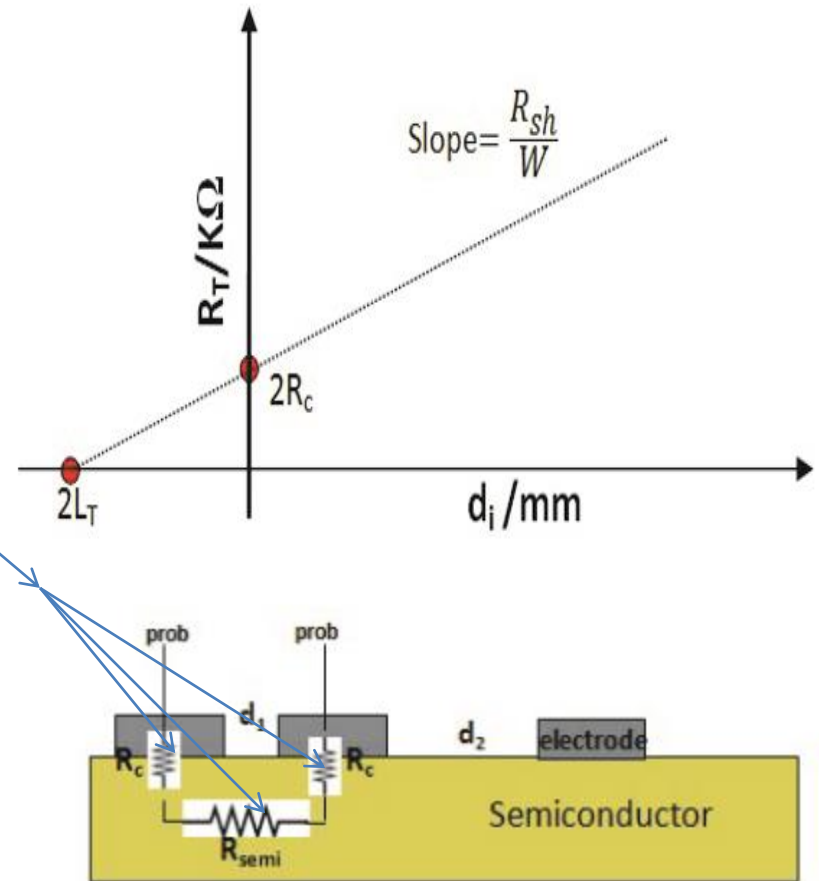
2. La jonction métal-semi-conducteur

Etape 3

Comme illustré ci-dessus, nous pouvons penser que la **résistance totale** entre deux contacts est la **combinaison en série de 3 résistances**:

Etant donné que les contacts ohmiques sont les mêmes, nous avons donc:

$$R_T = \frac{V}{I} = 2R_C + R_{semi} = 2R_C + R_{sh} \frac{d}{W}$$



Contact Métal-Métal et Métal-Semi-conducteur

2. La jonction métal-semi-conducteur

Etape 4:

A partir de la courbe, on détermine:

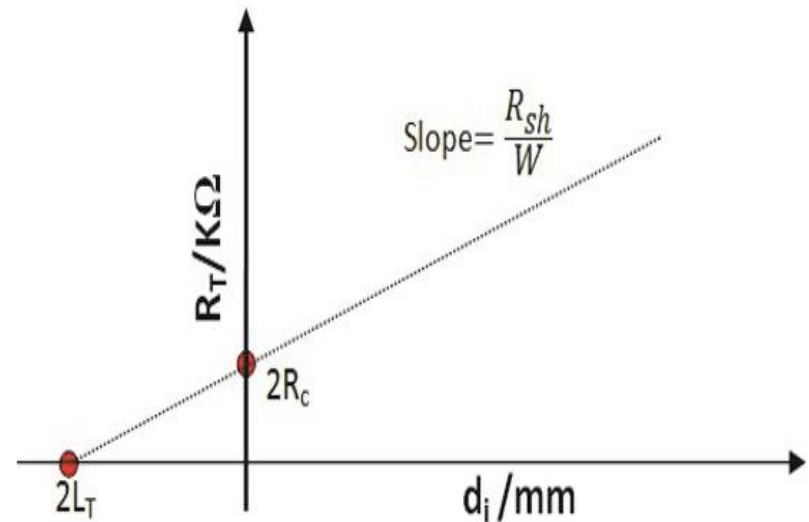
- R_C à partir, de l'ordonnée à l'origine:

$$d=0 \Rightarrow R_T = 2 R_C.$$

- R_{Sh} de la pente de la courbe:

$$\text{pente} = R_{sh}/W$$

- L_T à partir de l'intersection de la courbe avec l'axe des abscisse (d):
Intersection pour $R_T=0$ donne L_T



$$R_T = \frac{V}{I} = 2R_C + R_{semi} = 2R_C + R_{sh} \frac{d}{w}$$

$Y = ax + b$ $a = \frac{R_{sh}}{w}, \quad b = 2R_C$