

I.4 La résistance par carré (en Anglais sheet resistance)

La résistance par carré est noté par : R_{\square} ou R_s Elle est définie par :

$$R_{\square} = R_s = \frac{\rho}{t} \quad (22)$$

La résistance par carré : R_{\square} ou R_s est fréquemment utilisée lorsque l'épaisseur t est très faible comme c'est le cas des couche diffusées ou réalisées par implantation ionique, en plus des couches minces du silicium polycristallin (à titre d'exemple) et des couches de conducteurs métalliques.

I.4.1 Cas des 4 pointes alignés : effet de l'épaisseur à travers le facteur de forme F.

Dans le cas des 4 pointes alignées et séparées par la distance s , l'épaisseur des couches t doit vérifier la condition :

$$t \leq \frac{s}{2} \quad (23)$$

Dans ces conditions le facteur de forme F de l'équation (7) peut être exprimé sous la forme de 3 facteurs de formes F_1 , F_2 et F_3 :

$$F = F_1 F_3 \left(\frac{\text{Ln}(2) F_2}{\pi} \right) \quad (24)$$

F_1 corrige l'effet de l'épaisseur, F_2 corrige l'effet des dimensions latérales de l'échantillon, et F_3 corrige l'effet des placements des pointes par rapport à la bordure (Edge effect).

Pour les échantillons vérifiant la condition $t \leq \frac{s}{2}$, $F_3 = 1$ et F_2 est donné par :

$$F_2 = \left(\frac{\pi}{\text{Ln}(2)} \right) \quad (25)$$

Si la surface du dessous de la plaquette est non conductrice F_1 s'écrit :

$$F_1 = \left(\frac{\frac{t}{s}}{2\text{Ln}(2)} \right) \quad (26)$$

Avec ces corrections l'expression de la résistivité de l'équation (7) devient :

$$\rho = \frac{\pi t}{\text{Ln}(2)} \left(\frac{V}{I} \right) = 4,532 t \left(\frac{V}{I} \right) \quad (27)$$

Ceci permet de déduire la résistance par carré

$$R_{\square} = R_s = \frac{\rho}{t} = 4,532 \left(\frac{V}{I} \right) \quad (28)$$

Cette expression correspond à la figure I.2 qui montre que le courant électrique arrive par la pointe 1 et sort par la pointe 4 et le voltage est mesuré entre les pointes 2 et 3.

Lorsque le courant arrive et sort par d'autres pointes, les positions de mesure du voltage changent aussi. Les facteurs de correction correspondant à ces changements sont donnés dans le tableau I.1.

Tableau I.1. Valeurs des facteurs de correction en fonction des positions des pointes

Pointes du courant	Pointes du voltage	Facteur de correction
1,4	2,3	4,532
2,3	1,4	4,532
1,2	3,4	21,84
3,4	1,2	21,84
1,3	2,4	15,50
2,4	1,3	15,50

I.4.2 Résistance par carré de van der Pauw

A partir de l'équation (21) on peut calculer la résistance par carré :

$$R_{\square} = R_s = \frac{\rho}{t} = 4,532 R_{12,34} \quad (29)$$

I.5 Les formes utilisées des échantillons pour la mesure de la résistivité

La méthode de van der Pauw est fondée sur les exigences relatives aux contacts : Ils doivent avoir des dimensions très petites et localisés sur la périphérie de l'échantillon. Cependant les contacts réels possèdent des dimensions finies et peuvent ne pas être exactement sur la périphérie. Ces deux situations engendrent des incertitudes de mesures élevées. Pour éliminer ces erreurs plusieurs formes (symétriques) ont été adoptées et sont représentés sur la figure I.8.

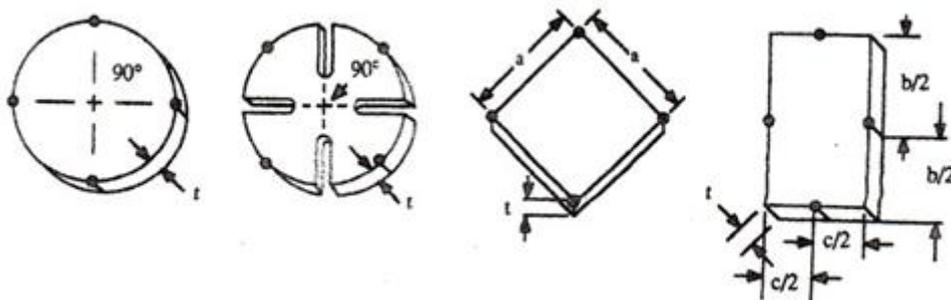


Figure I. 8 Formes des échantillons symétriques

Pour le carré certains auteurs préfèrent mettre les contacts au milieu des cotés. D'autre forme d'échantillons ont été dérivées de la structure conventionnelle de van der Pauw : la croix (cross) est représentée sur la figure I.9 et la structure croix-pont (cross-bridge) est montrée sur la figure I.10.

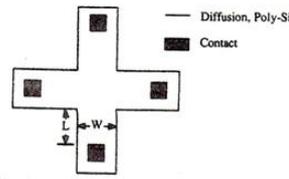


Figure I.9 Structure en croix utilisée pour la mesure de R_{\square} ou (R_s)

-Pour la croix il faut $L \geq W$.

-La structure cross-bridge permet de mesurer simultanément R_{\square} ou (R_s) et la largeur w à partir des équations

$$R_{\square} = \frac{\pi}{\ln(2)} \left(\frac{V_{12}}{I_{12}} \right) \quad (30)$$

$$R_{\square} = \frac{w}{L} \left(\frac{V_{23}}{I_{13}} \right) \quad (31)$$

$$w = R_{\square} \left(\frac{I_{13}}{V_{23}} \right) L \quad (32)$$

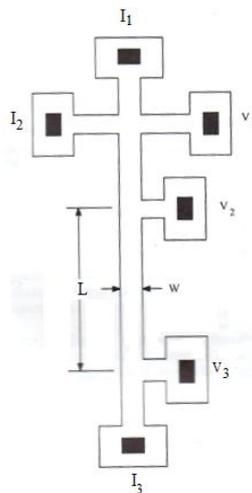


Figure I.10 Structure cross –bridge

Lorsque l'échantillon n'est pas symétrique le facteur de forme F (équations (16) et (17)) doit être pris en considération. Pour cela on peut utiliser la représentation graphique de F en fonction de R_r qui est indiquée sur la figure I.9.

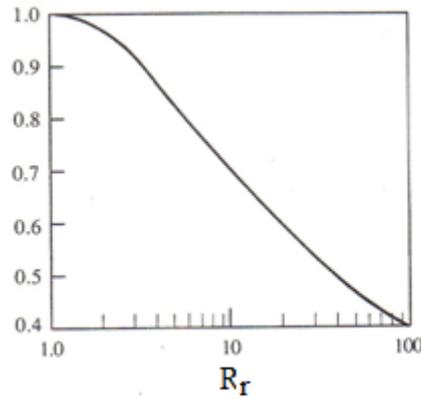


Figure I.9. Facteur de forme F en fonction de R_r

I.6 Les circuits de mesure de résistivité des sc

Les sc sont dans la catégorie des matériaux dont la résistivité est moyenne et pour laquelle la méthode de van der Pauw convient. Il ya plusieurs types de circuits de mesure de résistivité qui ont été adopté par l'ASTM International (ASTM : American Society for Testing and Materials).

Certains constructeurs ont fabriqué des systèmes de mesures versatiles dont le système de mesure à effet Hall (Hall measurement system ou HMS). Le HMS est un équipement dans lequel le constructeur a incorporé l'effet Hall et la méthode de van der Pauw. L'équipement est piloté par ordinateur et permet de mesurer principalement la résistivité ρ , la concentration des porteur n (ou p) et la constante de Hall R_H qui sont des caractéristiques très importantes des semiconducteurs.

I.7. L'effet Hall

I.7.1 Principe de l'effet Hall

Pour étudier l'effet Hall on considère un barreau sc ayant la forme d'un parallélépipède de largeur l et d'épaisseur t comme le montre la figure I.15. On considère que le sc est de type n et on néglige la présence des trous ($n \gg p$). L'orientation du barreau est réalisée par rapport au repère orthonormé (o, x, y, z) dont les axes ox , oy et oz sont respectivement munis des vecteurs unitaires $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$.

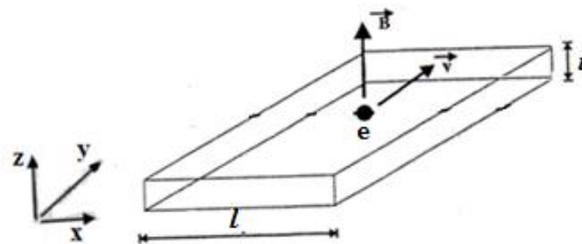


Figure I. 8 : Schémas de principe de l'effet Hall.

Le barreau est parcouru par un courant I constitués des électrons de charge $(-e)$ et ont une vitesse \vec{v} parallèle à l'axe oy et donc à \vec{j} . Le barreau est soumis à un à une champ magnétique \vec{B} parallèle à l'axe oz et donc à \vec{k} . On peut donc écrire :

$$\vec{v} = v_y \vec{j} \quad (22)$$

$$\vec{B} = B_z \vec{k} \quad (23)$$

On doit noter qu'on a :

$$|\vec{v}| = v = v_y \text{ et } |\vec{B}| = B = B_z \quad (33)$$

Les composantes v_y et B_z sont constantes.

Le déplacement des charges (ici les électrons) à une vitesse \vec{v} dans un champ magnétique \vec{B} engendre une force \vec{F} dite force de Lorentz qui s'écrit (en l'absence de champ électrostatique) :

$$\vec{F} = -e\vec{v} \wedge \vec{B} \quad (34)$$

$$\vec{F} = -ev_y B_z \vec{i} \quad (35)$$

Cette force pousse les électrons sur le côté gauche du barreau et fait apparaître des charges positives sur le côté droit du barreau comme l'indique la figure I.9.

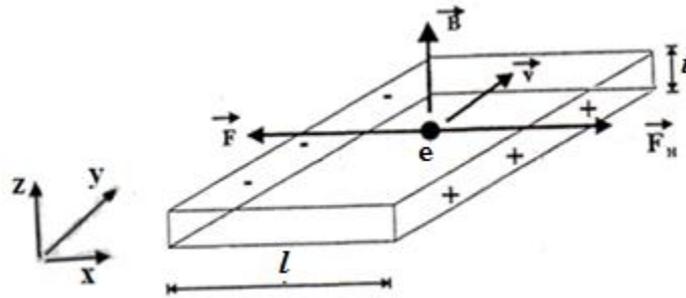


Figure I.9 Séparation des charges provoquée par la force \vec{F}

Cette séparation de charges conduit à l'apparition d'un champ électrique \vec{E}_H Qui fait subir aux électrons une force

$$\vec{F}_H = -e\vec{E}_H \quad (36)$$

Les électrons du barreau sont ainsi soumis aux deux forces \vec{F} et \vec{F}_H . A l'équilibre on a :

$$\vec{F} + \vec{F}_H = 0 \quad (37)$$

Ce qui permet de déduire l'expression du champ de Hall :

$$E_H = v_y B_z \quad (38)$$

A ce champ de Hall E_H correspond une tension de Hall V_H qui découle de la relation :

$$E = -\left(\frac{dV}{dx}\right) \quad (39)$$

En intégrant V sur la largeur l du barreau on obtient :

$$V_H = -v_y B_z l \quad (40)$$

La densité du courant J est relié à la vitesse v et à la concentration des porteurs n par :

$J = env$. On a aussi avec I l'intensité du courant et S la section du barreau donnée par $S = lt$. En tenant compte de l'équation (24) on obtient :

$$v = \left(\frac{I}{nelt}\right) \quad (41)$$

En remplaçant v_y par v dans V_H de l'équation (30) on obtient :

$$V_H = -\left(\frac{IB}{ne t}\right) = \left(-\frac{1}{ne}\right)\left(\frac{IB}{t}\right) \quad (42)$$

Qui s'écrit en fonction de la constante de Hall R_H :

$$V_H = (R_H)\left(\frac{IB}{t}\right) \quad (43)$$

$$R_H = \left(-\frac{1}{ne}\right) \quad (44)$$

L'expression (34) a été obtenue avec les électrons comme porteurs de charges de concentration n . Dans ce cas R_H peut être notée R_{Hn} . De plus il faut noter que $R_{Hn} < 0$

Lorsque les porteurs de charges sont des trous de concentration p on obtient :

$$R_{Hp} = \left(\frac{1}{pe}\right) \quad (45)$$

Ainsi pour les trous $R_{Hp} > 0$

I.7.2 Mobilité de Hall μ_H

La mobilité de Hall μ_H est différente de la mobilité de conduction μ . Cette différence vient du fait que lorsque on tient compte de la diffusion des électrons par les phonons et par les atomes des dopants les constantes de Hall R_{Hn} et R_{Hp} doivent être multipliées par un coefficient correctif r avec :

$$\frac{3\pi}{8} \leq r \leq \frac{315\pi}{512} \quad (46)$$

La constante de Hall devient alors :

$$\text{- Pour les électrons} \quad R_H = r R_{Hn} \quad (47)$$

$$\text{- Pour les trous} \quad R_H = r R_{Hp} \quad (48)$$

Comme la mobilité de Hall μ_H est définie par :

$$\mu_H = \frac{|R_H|}{\rho} \quad (49)$$

$$\text{Pour les trous on a :} \quad \mu_H = r \mu_p \quad (50)$$

$$\text{Pour les électrons on a :} \quad \mu_H = r \mu_n \quad (51)$$

I.7.3 Cas du semiconducteur contenant n et p (p n'est pas négligée):

Lorsque le semiconducteur contient les concentrations n et p , R_H est donnée par:

$$R_H = -\frac{r}{e} \frac{n u_n^2 - p u_p^2}{(n u_n + p u_p)^2} \quad (52)$$