

Mesure des caractéristiques électriques des semi-conducteurs en couches minces

par A. CAZARRE

Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes
31077 Toulouse Cedex

et R. VEHIL

Université Paul Sabatier de Toulouse
31062 Toulouse Cedex

RÉSUMÉ

La mesure des caractéristiques électriques des semi-conducteurs présente un intérêt pédagogique dans le cadre des filières d'enseignement en microélectronique. Nous présentons une méthode basée sur l'effet Hall associée au théorème de Van der Pauw, permettant de caractériser un semi-conducteur (GaAs) sous forme de couche mince. Le dispositif expérimental nécessaire est simple et peu coûteux.

1. INTRODUCTION

Les caractéristiques électriques des matériaux semi-conducteurs telles que la résistivité, la concentration et la mobilité des porteurs libres peuvent être déterminées à partir de techniques simples. Pour mesurer la résistivité il suffit d'appliquer la loi d'Ohm à un échantillon parcouru par un courant. Pour déterminer la concentration et la mobilité des porteurs libres on fait appel à l'effet Hall. Ces techniques imposent des géométries bien déterminées (parallélépipédiques) permettant des lignes de courant uniformes. Or, en pratique il est souvent difficile de disposer d'échantillons de semi-conducteurs qui satisfassent à ces conditions ; en effet, on est pratiquement toujours amené à caractériser des couches minces (1 à 10 microns) de type épitaxié (*), diffusé (**), ou implanté (***) dont les prises de contact sont

(*) couche mince obtenue par croissance cristalline en phase liquide ou en phase vapeur.

(**) couche mince obtenue par évaporation d'impuretés dans un four.

(***) couche mince obtenue par bombardement d'atomes d'impuretés.

localisées sur la surface périphérique. De ce fait les lignes de courant à travers l'échantillon ne sont plus uniformes ; dans ce cas l'application d'une méthode simple fondée sur le théorème de Van der Pauw (1) permet d'évaluer les propriétés de conduction des échantillons.

Cette technique est couramment utilisée dans les laboratoires industriels de semi-conducteurs sous forme automatisée. Dans cet article on décrit un dispositif expérimental simple permettant, dans un but pédagogique, de caractériser des couches semi-conductrices épitaxiées.

2. RAPPEL DE L'EFFET HALL

Lorsque un conducteur parallélépipédique parcouru par un courant I est placé dans un champ magnétique B perpendiculaire aux lignes de courant (voir figure 1) il apparaît une différence de potentiel transversale V_H appelée tension de Hall. Elle s'exprime par la relation :

$$V_H = R_H \cdot I \cdot B / d \quad (1)$$

où R_H est la constante de Hall et d l'épaisseur du conducteur.

La connaissance de la constante de Hall R_H permet de déduire la concentration et la mobilité des porteurs libres par les relations :

$$n = -1 / (R_H \cdot e) \quad (2)$$

$$\mu = R_H / \rho \quad (3)$$

où e est la charge élémentaire de l'électron et ρ désigne la résistivité du matériau.

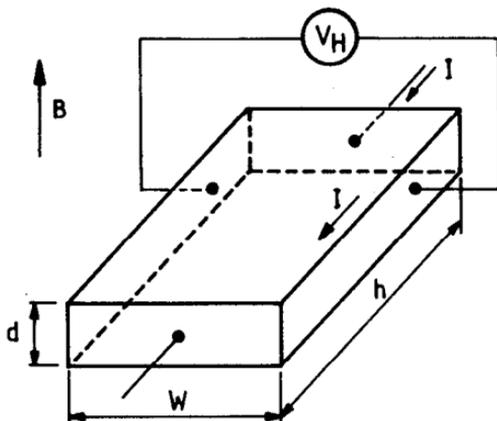


Figure 1 : Représentation schématique de l'effet Hall.

3. METHODE DE VAN DER PAUW

La méthode de Van der Pauw permet de mesurer la résistivité spécifique et la constante de Hall dans le cas d'un échantillon plan de forme quelconque, muni de quatre contacts disposés sur la périphérie (figure 2). L'échantillon doit être d'épaisseur homogène et la surface de prise de contact doit être faible vis-à-vis de la surface de l'échantillon. Dans ces conditions le théorème de Van der Pauw conduit à l'expression suivante :

$$\exp(-\pi R_{AB,CD} * d / \rho) + \exp(-\pi R_{BC,DA} * d / \rho) = 1 \quad (4)$$

où $R_{AB,CD} = (V_D - V_C) / I_{AB}$, $R_{BC,DA} = (V_A - V_D) / I_{BC}$, I_{AB} et I_{BC} sont les courants entre les bornes A,B et B,C.

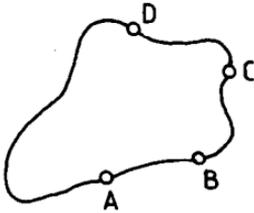


Figure 2 : Représentation d'un échantillon plan selon Van der Pauw (1).

Van der Pauw propose une géométrie en forme de trèfle afin de minimiser les erreurs liées à la taille finie des contacts. Green et Gunn (2), (3), ont montré que l'on pouvait utiliser des échantillons de forme quelconque (rectangulaires, carrés...), beaucoup plus faciles à réaliser technologiquement.

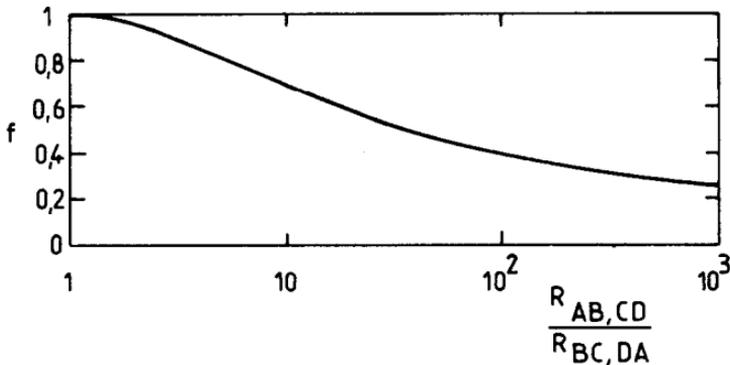


Figure 3 : Facteur de correction pour la résistivité de la couche mince de l'échantillon tenant compte de la dissymétrie de l'échantillon.

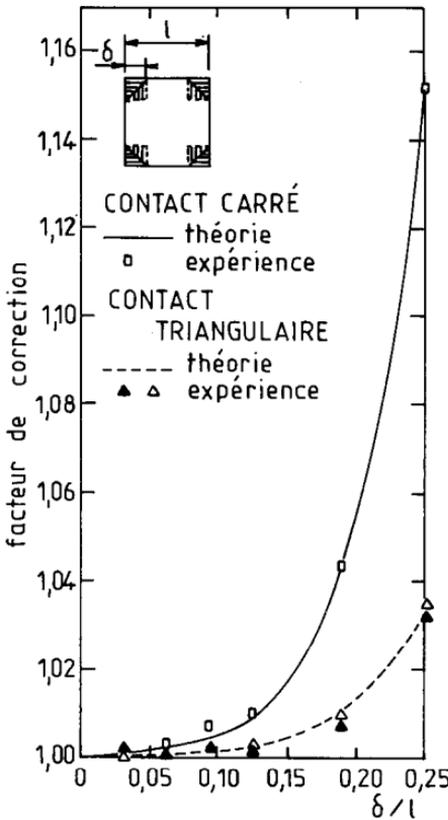


Figure 4 : Facteur de correction pour la résistivité de la couche mince en fonction de la dimension relative des prises de contact d'après Chwang et al. (4).

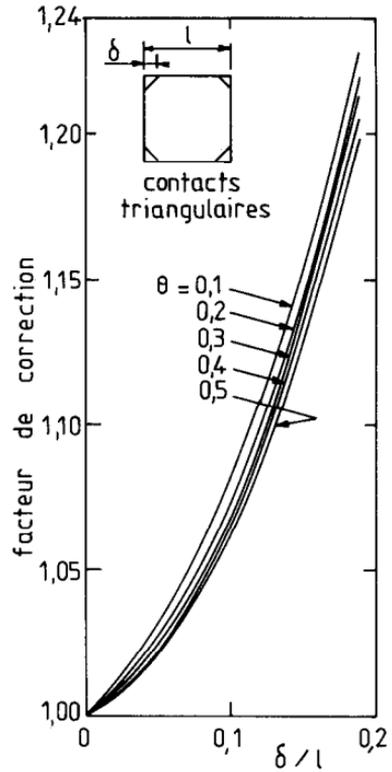


Figure 5 : Facteur de correction pour la tension de Hall en fonction de la dimension relative des prises de contact d'après Chwang et al. (49).

La détermination de la résistivité nécessite parfois la prise en compte, d'une part, de l'éventuelle dissymétrie des contacts ou de l'inhomogénéité de la couche et d'autre part, des dimensions relatives des contacts par rapport à la taille de l'échantillon. Ces effets sont pris en considération au moyen de facteurs de correction multiplicatifs. Sur la figure 3 on représente le facteur de correction tenant compte de la dissymétrie. On constate que dans le cas des échantillons carrés à couche homogène le terme correctif est voisin de 1. Par ailleurs le terme correcteur introduit par la taille finie des contacts pour les géométries carrées est représentée sur la figure 4. On remarque que pour un choix judicieux des dimensions relatives des contacts conduit à une valeur du terme correctif proche de 1. Dans ces conditions, pour des échantillons carrés, l'expression de la résistivité peut s'écrire :

$$\rho = \frac{\pi \cdot d}{\ln 2} \left(\frac{R_{AB,CD} + R_{BC,DA}}{2} \right) \quad (5)$$

Dans le cas de la détermination de la constante R_H pour des couches minces, on introduit de même, un facteur correctif, fonction de la taille relative des contacts. Sur la figure 5 on montre, dans le cas d'échantillons carrés, sa variation pour différentes valeurs de l'angle de Hall (avec $\tan \theta = R_H \cdot B/\rho$). Comme dans le cas précédent on constate que la pondération de R_H est voisine de 1 pour des surfaces de contact faibles par rapport à celle de l'échantillon.

Dans ces conditions il est possible de déterminer les caractéristiques électriques d'échantillons semi-conducteurs à l'aide de formules simples. Il faut pour cela choisir la géométrie la plus symétrique possible avec des prises de contact de faible dimension. Dans ce cas la résistivité et la constante de Hall sont déduites des formules (1) et (5).

4. MESURE DES CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES DE QUELQUES ÉCHANTILLONS

4.1. Choix des échantillons.

Le semi-conducteur le plus utilisé est le silicium qui est à la base des circuits intégrés. Ce matériau a des mobilités généralement comprises entre 400 et 1000 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ suivant son dopage. Il se trouve sous la forme de couches diffusées, épitaxiées ou implantées.

Depuis quelques années des matériaux nouveaux appartenant au groupe III-V se développent particulièrement dans le domaine des communications à haut débit. Parmi ces matériaux l'arséniure de gallium (GaAs) est l'un des plus étudiés dans les laboratoires de recherches. Ce semi-conducteur présente des potentialités très avantageuses, notamment sa très forte mobilité électronique qui lui confère de très bonnes performances en haute fréquence. Dans le cadre des mesures d'effet Hall, ce matériau présente l'intérêt de mettre en évidence des tensions V_H relativement élevées (supérieure au millivolt), ce qui permet l'utilisation d'appareils de mesure peu onéreux. C'est la raison pour laquelle on a choisi des échantillons en GaAs dopés n (électrons majoritaires), épitaxiés sur un substrat semi isolant.

4.2. Méthode de mesure.

L'objectif de la manipulation est de déterminer les valeurs de la résistivité, de la concentration électronique n et de la mobilité μ de nos échantillons à la température ambiante. Les formules 1, 2, 3 et 5 montrent que cela se réduit à des mesures de tension et de courant (la valeur de

l'induction B est déterminée à partir du courant qui passe dans les bobines de l'électroaimant). On améliore la précision des résultats en procédant à un grand nombre de mesures par permutation des contacts et des sens de courant. Dans tous les cas on retient les valeurs absolues des grandeurs mesurées. On utilise des semi-conducteurs de forme carrée ayant des prises de contact triangulaires de faible dimensions. Dans ces conditions les termes correctifs à appliquer à la résistivité et à la constante R_H mesurées sont pris égaux à l'unité.

Dans ce type de manipulation certaines précautions sont nécessaires : mesures à faible niveau (inférieure à $1V/cm$), hors des influences HF, absence des contraintes mécaniques sur les échantillons, absence d'effets photovoltaïques (obscurité...)

a) Mesure des résistivités

Les résultats des mesures présentés ici concernent des échantillons de faible résistivité (inférieure à 1 Ohm.cm).

La procédure complète pour mesurer la résistivité r_0 des échantillons est illustrée sur la figure 6.

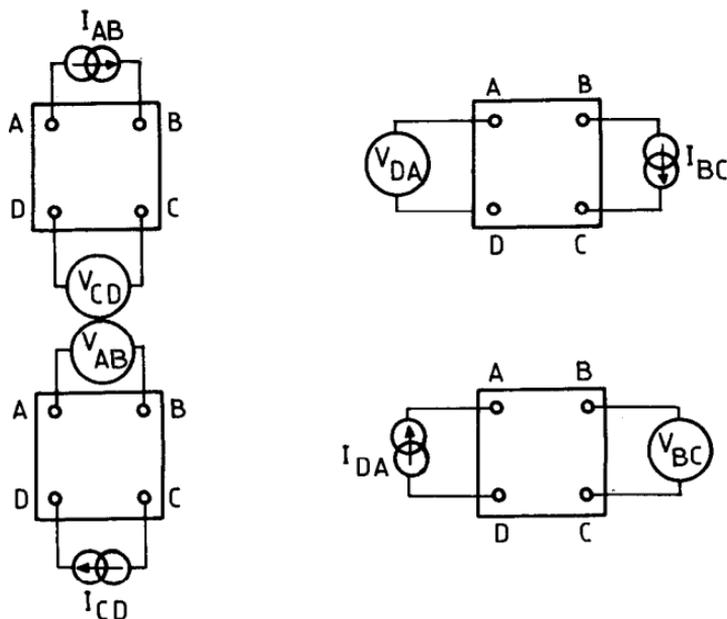


Figure 6 : Représentation schématique de la technique de mesure de la résistivité pour une couche mince.

Echantillon 1 : épaisseur $d = 4 \mu\text{m}$						
I (mA)	V1 (mV)	V2 (mV)	V3 (mV)	V4 (mV)	R_m (Ohm)	ρ (Ohm.cm)
1	204	60,3	193	58,5	128,8	0,23
-1	182	62,4	213	56,8		
Echantillon 2 : épaisseur $d = 3,2 \mu\text{m}$						
I (mA)	V1 (mV)	V2 (mV)	V3 (mV)	V4 (mV)	R_m (Ohm)	ρ (Ohm.cm)
1	13,5	13,6	13,5	13,2	13,7	0,02
-1	14,1	14,0	14,1	13,9		
Echantillon 3 : épaisseur $d = 1 \mu\text{m}$						
I (mA)	V1 (mV)	V2 (mV)	V3 (mV)	V4 (mV)	R_m (Ohm)	ρ (Ohm.cm)
1	9,8	13,2	9,9	13,2	11,5	0,0052
-1	9,8	13,2	9,9	13,2		
Echantillon 4 : épaisseur $d = 1 \mu\text{m}$						
I (mA)	V1 (mV)	V2 (mV)	V3 (mV)	V4 (mV)	R_m (Ohm)	ρ (Ohm.cm)
1	6,9	7,4	7,0	7,4	7,2	0,0033
-1	6,9	7,4	7,0	7,3		

Tableau I : Valeurs mesurées pour quatre échantillons différents.

On fait passer un courant continu I de faible intensité (1 mA) à travers le semi-conducteur. Afin d'éviter d'éventuelles chutes de tension introduites par les prises de contact A et B, on mesure la différence de potentiel entre les deux plots C et D (5). Par permutation circulaire des sens de courant et des prises de tension on en déduit un ensemble de valeurs de R dont on détermine la valeur moyenne R_m :

$$R_m = \sum_{i=1}^8 \frac{R_i}{8} \quad (6)$$

Sur le tableau I on montre les résultats obtenus sur un ensemble de mesures.

L'examen de ces résultats amène à quelques remarques. Les valeurs des tensions mesurées par permutation circulaire sont proches les unes des autres pour les échantillons 2, 3 et 4. En ce qui concerne l'échantillon 1 on constate que le rapport des tensions successives est très différent de 1. Compte tenu de la symétrie des échantillons utilisés ce résultat doit être attribué à une inhomogénéité dans l'épaisseur de la couche épitaxiée. On peut constater aussi que le changement de sens du courant par permutation des contacts conduit à des valeurs de tension voisines. Ceci confirme la bonne qualité de contacts ohmiques.

b) Mesure de la mobilité

La procédure de mesure est schématisée sur la figure 7.

On établit un courant I entre deux contacts situés sur une diagonale de l'échantillon, celui-ci étant dans l'entrefer d'un électroaimant. La méthode consiste à mesurer la variation de la tension transversale qui existe entre les points situés sur l'autre diagonale, lorsqu'on crée une induction magnétique B . La valeur moyenne V_{hm} de cette variation de tension donne accès à la constante de Hall :

$$R_h = \frac{V_{hm} \cdot I \cdot B}{d} \quad (7)$$

La concentration extrinsèque et la mobilité sont alors données par les relations 2 et 3.

Afin d'améliorer la précision des résultats on procède à des mesures dans lesquelles on permute successivement les prises de tension et de courant (figures 7a et 7b). On inverse dans chaque cas le sens de I et de B .

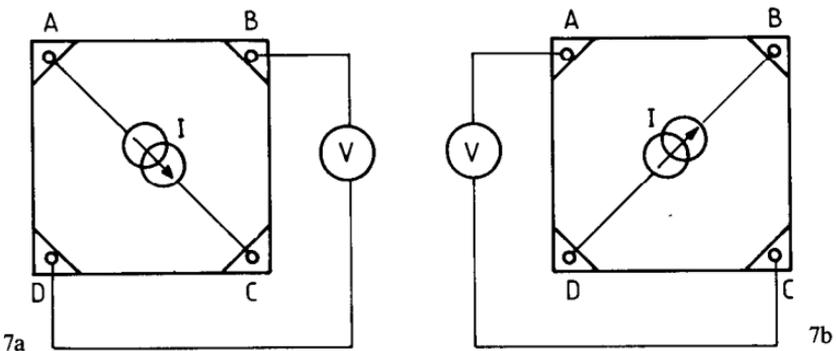


Figure 7 : Représentation schématique de la technique de mesure de la tension de Hall pour une couche mince.

Echantillon 1 : épaisseur $d = 4 \mu\text{m}$						
I (mA)	V_0 (mV)	V(+B) (mV)	V(-B) (mV)	$V_h(+B)$ (mV)	$V_h(-B)$ (mV)	V_{h_m} (mV)
1	189,3	254,3	129,9	65,0	66,4	65,8
-1	227,1	292,9	160,9	65,8	66,2	
Rh = 981 cm ³ /Cb n = 6,0 10 ¹⁵ cm ⁻³ $\mu = 4210 \text{ cm}^2/\text{V.s}$						
Echantillon 2 : épaisseur $d = 3,2 \mu\text{m}$						
I (mA)	V_0 (mV)	V(+B) (mV)	V(-B) (mV)	$V_h(+B)$ (mV)	$V_h(-B)$ (mV)	V_{h_m} (mV)
1	1,31	9,00	6,53	7,69	5,22	6,49
-1	1,25	8,99	6,57	7,74	5,32	
Rh = 69,3 cm ³ /Cb n = 9,0 10 ¹⁶ cm ⁻³ $\mu = 3400 \text{ cm}^2/\text{V.s}$						
Echantillon 3 : épaisseur $d = 1 \mu\text{m}$						
I (mA)	V_0 (mV)	V(+B) (mV)	V(-B) (mV)	$V_h(+B)$ (mV)	$V_h(-B)$ (mV)	V_{h_m} (mV)
1	3,37	4,79	1,89	1,42	1,48	1,46
-1	3,38	4,84	1,92	1,46	1,46	
Rh = 4,87 cm ³ /Cb n = 1,3 10 ¹⁸ cm ⁻³ $\mu = 930 \text{ cm}^2/\text{V.s}$						
Echantillon 4 : épaisseur $d = 1 \mu\text{m}$						
I (mA)	V_0 (mV)	V(+B) (mV)	V(-B) (mV)	$V_h(+B)$ (mV)	$V_h(-B)$ (mV)	V_{h_m} (mV)
1	0,18	1,12	0,73	0,94	0,55	0,73
-1	0,20	1,11	0,72	0,91	0,52	
Rh = 2,4 cm ³ /Cb n = 2,5 10 ¹⁸ cm ⁻³ $\mu = 745 \text{ cm}^2/\text{V.s}$						

Tableau II : Résultats expérimentaux de mobilité et concentration par effet Hall.

Les valeurs plus ou moins importantes de la tension V_0 , mesurée en absence d'induction magnétique, sont à attribuer à l'effet des contacts non

alignés. Cet effet dépend de la microsoudure des fils lors du montage des échantillons. Cependant la seule prise en compte de la variation de tension consécutive à l'application du champ magnétique permet de s'affranchir de cet effet.

Pour une induction magnétique de 0,4 Tesla et un courant de 1 mA on obtient les résultats du tableau II.

On constate sur ce tableau une certaine cohérence des mesures. La figure 8 montre la décroissance de la mobilité en fonction de la concentration électronique. On remarque que par rapport aux valeurs classiques du silicium, l'arséniure de gallium présente une mobilité électronique environ cinq fois plus élevée, ce qui donne à ce matériau un intérêt certain. En effet cette propriété intrinsèque rend le matériau GaAs très intéressant dans le domaine des composants électroniques fonctionnant à très haute fréquence (plusieurs GHz) (7). En outre, dans le cadre des travaux pratiques universitaires, ce matériau s'avère facile à caractériser avec des appareils de mesure traditionnels.

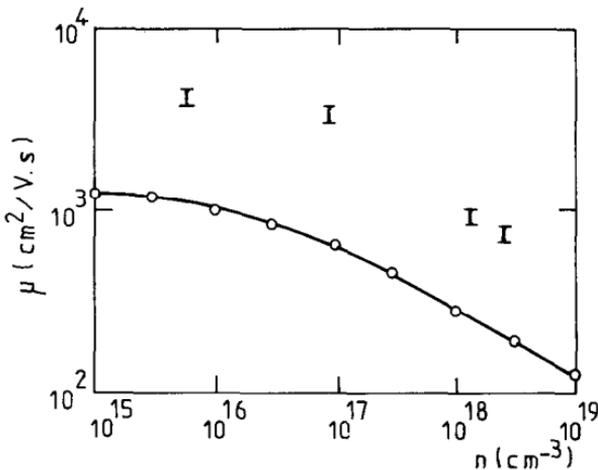


Figure 8 : Variation de la mobilité en fonction de la concentration sur le GaAs (comparaison avec le Si). (o) : (Silicium) ; (◻) : points expérimentaux sur GaAs ($\Delta\mu / \mu = 11 \%$).

5. CONCLUSION.

Nous avons proposé une méthode de caractérisation des semi-conducteurs en couches minces à partir de la technique de Van der Pauw. Elle a l'avantage de mettre en jeu un dispositif expérimental simple et peu onéreux. Cela permet l'étude des caractéristiques de conduction des semi-conducteurs (résistivité, mobilité), dans le cadre d'un enseignement orienté vers les connaissances de base en micro-électronique.

A partir d'échantillons de GaAs de type n, de géométrie simple fabriqués en laboratoire, on a pu effectuer des mesures de résistivité et de mobilité pour différentes concentrations des porteurs. En outre, dans le cas d'échantillons symétriques, les résultats obtenus montrent qu'il est possible de mettre en évidence des inhomogénéités dans la réalisation des couches minces (ce qui permet un contrôle dans les processus de fabrication). Par ailleurs on a illustré l'évolution de la résistivité et de la mobilité en fonction du taux d'impuretés dopantes présentes dans la couche. Elle nous a permis d'effectuer une comparaison du AsGa avec le Si, matériau le plus couramment utilisé industriellement. On peut relever pour le AsGa une valeur de la mobilité beaucoup plus élevée ce qui rend ce matériau très intéressant pour le type de manipulation mis en œuvre.

REMERCIEMENTS

Nous remercions M. Munoz-Yague (6), Directeur de Recherche au Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes du C.N.R.S. pour son aimable collaboration et échanges fructueux.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) Van der Pauw, L.J., 1958 : A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape. Philips Research Report 13, 1-9.
- (2) Green, M.A. and Gunn, M.W., 1971 : The Evaluation of Geometrical Effects in Four Point Proche measurements. Solid State Electron. 14, 1167-1177.
- (3) Green, M.A. and Gunn, M.W., 1972 : Four Point Probe Hall Effect and Resistivity Measurements upon Semiconductors. Solid State Electron. 14, 577-585.
- (4) Chwang, R., Smith, B.J. and Crowell, C.R., 1974 : Contact Size Effects on the Van der Pauw Method for Resistivity and Hall Coefficient Measurement. Solid State Electron. 17, 1217-1227.
- (5) Shockley, W., et Pearson, G.L., 1948 : Physic Rev. 74, 232.
- (6) A. Munoz-Yague et S. Bacereido, 1980 : Système automatique de mesures et de résistivité et de coefficient de Hall par la méthode de Van der Pauw. L.A.A.S. du C.N.R.S.
- (7) A. Marty, 1980 : Sur l'étude des transistors bipolaires à hétéro jonction GaAlAs/GaAs : théorie et expérience. Thèse d'Etat, Université Paul Sabatier de Toulouse.