REVUE DE PHYSIQUE APPLIQUÉE

Revue Phys. Appl. 25 (1990) 475-479

JUIN 1990, PAGE 475

Classification

Physics Abstracts

73.40L — 73.60F — 73.90

Détermination de la résistance d'une couche sur substrat non isolant

H. Luquet, L. Gouskov, M. Pérotin, M. H. Archidi, F. Pascal et G. Bougnot

Centre d'Electronique de Montpellier, associé au CNRS, U.A. 391, Université des sciences et Techniques du Languedoc, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5, France

(Reçu le 15 décembre 1989, révisé le 13 février 1990, accepté le 9 mars 1990)

Résumé. — Dans le but de caractériser des couches d'antimoniures épitaxiées ou implantées mal isolées d'un substrat conducteur, nous avons été amenés à utiliser une méthode simple de détermination de la résistance de couche. Cette méthode est décrite ainsi que sa limite de validité en supposant une conduction ohmique ou régie par la génération-recombinaison entre la couche et le substrat.

Abstract. — In order to characterize epitaxial or implanted antimonide layers on conducting substrates, we propose a simple method for the determination of the layer resistance and we discuss the limits of its validity in the following conditions of conduction between the layer and the substrate: ohmic type, generation-recombination type.

1. Introduction.

La caractérisation électrique d'une couche épitaxiée est aisément réalisable lorsque le substrat est isolant ou de type opposé à celui de la couche ; dans ce dernier cas, l'isolement électrique dû à la zone déplétée dépend de la qualité et de l'homogénéité de la jonction réalisée. Lorsque l'isolement est bon, la méthode de mesure de résistivité de couche la plus communément utilisée est alors la méthode des quatre pointes [1]. La connaissance de la résistance de couche est importante pour de nombreuses applications, par exemple elle conditionne la valeur de la résistance série des cellules solaires [2], une valeur trop élevée pouvant réduire leur rendement.

Dans le cadre d'une étude de l'élaboration et de la caractérisation de couches d'antimoniures (GaSb, GaAlSb, GaInSb) épitaxiées sur GaSb, nous avons été amenés à déterminer la résistance de couches déposées sur substrat de type opposé, la jonction n'assurant pas un isolement électrique satisfaisant. Nous présentons le principe de la méthode utilisée ainsi que les résultats de son application à divers échantillons.

2. Dispositif utilisé.

Le dispositif mesa réalisé par photolithographie est représenté sur la figure 1. Dans le cas d'une couche p déposée sur substrat n, le contact arrière est réalisé

par évaporation de l'eutectique Au-Ge suivie d'un recuit sous H_2 ($T = 250^\circ C$, $t = 15$ mn) le contact avant étant constitué par de l'or pur non recuit.

Fig. 1. — Dispositif mesa utilisé pour la détermination de la résistance de couche R_1 .

[Mesa device used for the determination of the layer resistance R_1 .]

Les prises de contact 1 et 2 sur la couche se font à l'aide de fils d'aluminium soudés aux ultrasons, le contact arrière 3 est obtenu par collage à la laque d'argent.

3. Méthode.

Considérons la figure 2a ; la variation du potentiel le long de la couche s'écrit :

$$dV = \frac{R_1}{w} i dx \quad (1)$$

R_1 : résistance carrée de couche ;

i : courant dans l'échantillon ;

a)

b)

Fig. 2. — a) Conduction dans une couche déposée sur substrat. b) Schéma du montage de mesure.

[a) Conduction in a layer deposited on a substrate. b) Measurement set up.]

Les fuites de courant transversales peuvent s'écrire :

$$di = -J(V) w dx ,$$

$J(V)$: densité de courant transversal .

3.1 POUR DES FUITES DE COURANT OHMIQUES. — $J(V)$ s'écrit sous la forme $J(V) = V/R_2$, R_2 : résistance spécifique de fuite ($\Omega \text{ cm}^2$)

$$di = -\frac{V}{R_2} w dx . \quad (2)$$

Les relations (1) et (2) conduisent à l'équation différentielle suivante :

$$\frac{d^2V}{dx^2} - \frac{R_1}{R_2} V = 0 , \quad \frac{d^2V}{dx^2} - aV = 0 ,$$

$$\text{en posant } a = \frac{R_1}{R_2} . \quad (3)$$

La solution de cette équation pour $V(0) = V_0$ et $V(x_n) = V_n$ est

$$V_x = \frac{V_n \text{sh}(\sqrt{a} x) + V_0 \text{sh}(b - \sqrt{a} x)}{\text{sh} b} , \quad b = \sqrt{a} x_n . \quad (4)$$

On en déduit les courants aux extrémités

$$i_0 = -\frac{w}{R_1} \frac{dV}{dx} (x=0) = \frac{w}{\sqrt{R_1 R_2}} \left(\frac{V_0 \text{ch} b - V_n}{\text{sh} b} \right) \quad (5)$$

$$i_n = -\frac{w}{R_1} \frac{dV}{dx} (x=x_n) = \frac{w}{\sqrt{R_1 R_2}} \left(\frac{V_0 - V_n \text{ch} b}{\text{sh} b} \right) . \quad (6)$$

Les équations (5) et (6) permettent de déterminer R_1 et R_2 :

$$R_1 = \frac{wb \text{ch} b - 1}{x_n \text{sh} b} \frac{V_0 + V_n}{i_0 - i_n} \quad (7)$$

et

$$R_2 = \frac{wx_n \text{ch} b - 1}{b \text{sh} b} \frac{V_0 + V_n}{i_0 - i_n}$$

avec

$$\text{ch} b = \frac{i_0 V_0 + i_n V_n}{i_n V_0 + i_0 V_n} .$$

Dans ce cas la meilleure précision sur i_0 et i_n sera obtenue par des valeurs de V_0 et V_n très différentes dans la mesure où pour cet écart la conduction couche-substrat reste ohmique.

Pour la géométrie de notre échantillon $w = x_n = 200 \mu\text{m}$. Le schéma du dispositif de mesure de i_0 , i_n , V_0 , V_n est donné sur la figure 2b.

3.2 POUR DES FUITES DE COURANT CORRESPONDANT AU COURANT DE G-R D'UNE JONCTION.

$$J(V) = k(V_D + V)^{1/2} = k(V_D + V_0 + V - V_0)^{1/2} , \quad (8)$$

V_D : tension de diffusion de la jonction.

Si en chaque point $V_0 - V_x \ll V_D + V_0$ on peut alors écrire

$$\begin{aligned} J(V) &= k(V_D + V_0)^{1/2} \left[1 + \frac{1}{2} \frac{V - V_0}{V_D + V_0} \right] \\ &= \frac{k}{2\sqrt{V_D + V_0}} [2V_D + V_0 + V] \\ &= \frac{k(2V_D + V_0)}{2\sqrt{V_D + V_0}} + \frac{k}{2\sqrt{V_D + V_0}} V . \end{aligned}$$

Cette approximation permet donc d'écrire $J(V)$ sous la forme linéaire suivante :

$$J(V) = \frac{2 V_D + V_0}{R_2'} + \frac{V}{R_2'}; \quad (9)$$

en posant

$$R_2' = \frac{2 \sqrt{V_D + V_0}}{k} \quad (10)$$

l'équation différentielle (3) devient

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = \frac{R_1}{R_2'} (2 V_D + V_0) + \frac{R_1}{R_2'} V \quad (11)$$

dont la solution s'écrit

$$V_x = V_0' \frac{\text{sh}(b' - \sqrt{ax})}{\text{sh } b'} + \frac{V_n' \text{sh}(\sqrt{ax})}{\text{sh } b'} - (2 V_D + V_0) \quad (12)$$

$$V_0' = 2(V_D + V_0), \quad V_n' = V_n + V_0 + 2 V_D,$$

$$a = \frac{R_1}{R_2'}, \quad b' = \text{ch}^{-1} \frac{i_0}{i_n} \frac{V_0' + V_n'}{V_0' + \frac{i_0}{i_n} V_n'} = \sqrt{ax_n}.$$

Les valeurs R_1 et R_2' se déduisent des valeurs de i_0 , i_n , V_0 , V_n par les relations suivantes :

$$R_1 = \frac{wb' \text{ch } b' - 1}{x_n \text{sh } b'} \frac{V_0' + V_n'}{i_0 - i_n} \quad (13)$$

$$R_2' = \frac{wx_n \text{ch } b' - 1}{b' \text{sh } b'} \frac{V_0' + V_n'}{i_0 - i_n}.$$

Les figures 3a et b présentent à titre d'exemple la variation de la tension V entre des valeurs données V_0 et V_n aux extrémités de l'échantillon pour différentes valeurs du paramètre a . Ces courbes permettent d'estimer la limite de validité de l'approximation linéaire c'est-à-dire la condition

$$V_0 - V_x \ll V_D + V_0.$$

Pour $V_0 = 1,1$ V, $V_n = 1$ V, $V_D = 0,5$ V en choisissant $\frac{V_0 - V_x}{V_D + V_0} \leq \frac{1}{10}$ pour que l'approximation

linéaire permettant de déduire la résistance de couche R_1 de la relation (13) soit valable, on détermine la valeur limite $a = 500 \text{ cm}^{-2}$ soit $R_1/(R_2/x_n^2) = 1/5$. Pour $V_0 = 10$ V, $V_n = 9,5$ V on détermine la même valeur limite. Cette limite correspond à un facteur cinq entre la conductance de la couche et celle du dipole couche-substrat.

4. Résultats.

COUCHES POUR LESQUELLES LE SHUNT EST OHMIQUE. — Ce sont des couches de GaSb p épitaxiées

Fig. 3. — Distribution du potentiel le long de la couche pour différentes valeurs de V_0 , V_n , et de paramètre a pour $V_D = 0,5$ V (relation (12)).

[Potential distribution along the layer for various V_0 , V_n and a values, for $V_D = 0.5$ V (relation (12)). 1) $a = 125 \text{ cm}^{-2}$; $R_1 x_n^2/R_2' = 1/20$. 2) $a = 250 \text{ cm}^{-2}$; $R_1 x_n^2/R_2' = 1/10$. 3) $a = 500 \text{ cm}^{-2}$; $R_1 x_n^2/R_2' = 1/5$. 4) $a = 1250 \text{ cm}^{-2}$; $R_1 x_n^2/R_2' = 1/2$. 5) $a = 2500 \text{ cm}^{-2}$; $R_1 x_n^2/R_2' = 1$. 6) $a = 5000 \text{ cm}^{-2}$; $R_1 x_n^2/R_2' = 2$. a) $V_0 = 1.1$ V, $V_n = 1$ V. b) $V_0 = 10$ V, $V_n = 9.5$ V.]

par MOCVD sur substrat GaSb n. Nous présentons les résultats relatifs à deux couches « a » et « b ». Les qualités d'isolement de ces deux couches sont illustrées par les caractéristiques $I_{13} = f(V_{13})$ de la figure 4, on note le caractère quasi-ohmique de cet isolement. Les caractéristiques $I_{12} = f(V_{12})$ sont représentées sur la même figure. Le tableau I présente les résultats obtenus. Pour la couche « a » on observe que lorsque $V_0 - V_n$ est faible (20 mV) la détermination de R_1 est très imprécise, lorsque cet écart augmente, les valeurs de R_1 ne dépendent pas (à 10 % près) de V_0 ou de $V_0 - V_n$. Le défaut

Fig. 4. — Caractéristiques $I_{12} = f(V_{12})$ et $I_{13} = f(V_{13})$ (inverse) pour 2 échantillons « a » et « b » constitués par des couches de GaSb p épitaxiées par MOCVD sur GaSb n. Cas d'un shunt ohmique.

[Reverse $I_{12} = f(V_{12})$ and $I_{13} = f(V_{13})$ for 2 samples « a » and « b »: epitaxial p GaSb layers (MOCVD) on n GaSb substrate. Ohmic shunt case.]

Tableau I. — Valeurs des résistances de couche (R_1) et de fuite ($R_2/x_n w$) pour plusieurs valeurs de V_0 et $V_0 - V_n$ déterminées sur deux échantillons « a » et « b ».

[Layer resistance (R_1), shunt resistance ($R_2/x_n w$) for various values of V_0 and ($V_0 - V_n$) determined on two samples « a » and « b ».]

V_0 (mV)	$V_0 - V_n$ (mV)	R_1 (Ω)	R_2/x_n^2 (Ω)	
2 000	120	485	4 954	couche a
2 000	843	1 356	5 307	
2 000	1 668	1 380	5 401	
6 000	52	1 430	3 460	couche a
6 000	4 971	1 410	3 510	
2 000	694	668	159 000	couche b

d'isolement conduit à sous-estimer la valeur de la résistance de couche si on la déduit de la caractéristique $I_{12} = f(V_{12})$, en effet pour la couche « a » (V_{12}/I_{12}) = 1 210 Ω alors que R_1 = 1 400 Ω .

Pour la couche bien isolée de l'échantillon « b », la mesure de la caractéristique $I_{12} = f(V_{12})$ permet la détermination de la résistance de couche : (V_{12}/I_{12}) = 645 Ω , cette valeur est équivalente à celle déduite de la méthode décrite : R_1 = 668 Ω .

COUCHE POUR LESQUELLES LE SHUNT N'EST PAS OHMIQUE. — Trois échantillons illustrent ce comportement : les échantillons A45-2 et A42-1 constitués par des couches p⁺ implantées Be⁺ dans des couches

Fig. 5. — Caractéristiques $I_{12} = f(V_{12})$ et $I_{13} = f(V_{13})$ (inverse) pour deux échantillons A45-2 et A42-1 constitués par des couches de $\text{Ga}_{0.96}\text{Al}_{0.04}\text{Sb}$ p⁺ implantées Be⁺ dans des couches LPE de $\text{Ga}_{0.96}\text{Al}_{0.04}\text{Sb}$ n, et de l'échantillon PI 17 constitué par une couche de $\text{Ga}_{0.66}\text{In}_{0.34}\text{Sb}$ p épitaxiée par MOCVD sur substrat GaSb n.

[Reverse $I_{12} = f(V_{12})$ and $I_{13} = f(V_{13})$ characteristics for 2 samples A45-2 and A42-1 : p⁺ $\text{Ga}_{0.96}\text{Al}_{0.04}\text{Sb}$ obtained by Be implantation in LPE n GaAlSb layers and one sample PI 17 : p $\text{Ga}_{0.66}\text{In}_{0.34}\text{Sb}$ layer grown by MOCVD on n GaSb substrate.]

épitaxiées LPE de $\text{Ga}_{0,96}\text{Al}_{0,04}\text{Sb}$ n, et l'échantillon PI 17 constitué par une couche p de $\text{Ga}_{0,66}\text{In}_{0,34}\text{Sb}$ épitaxiée par MOCVD sur substrat GaSb n. La figure 5 montre les caractéristiques $I_{12} = f(V_{12})$ et $I_{13} = f(V_{13})$ de ces trois échantillons. Comme dans le cas précédent, les valeurs de R_1 sont aléatoires lorsque $V_0 - V_n$ est faible. Au-delà d'un seuil de l'ordre de la dizaine de mV, la variation de R_1 en fonction de $(V_0 - V_n)/V_0$ est représentée sur la figure 6. Pour les trois échantillons étudiés on

Fig. 6. — Variation de la résistance de couche R_1 déduite de la relation (10) en fonction de $(V_0 - V_n)/V_0$.

[Variation of the layer resistance R_1 versus $(V_0 - V_n)/V_0$]

note que R_1 est constant tant que $(V_0 - V_n)/V_0$ reste inférieur à 10^{-1} . Cette constatation expérimentale confirme, comme cela a été établi en 3b, que pour déduire R_1 par cette méthode, il faut que la variation de potentiel le long de la couche soit assez faible pour que l'on puisse considérer les fuites uniformes. La figure 7 présente les variations de la résistance de fuite ($R_2/x_n w$) en fonction de la polarisation V_0 des échantillons mettant en évidence le caractère non ohmique du contact couche-substrat.

Fig. 7. — Variation de la résistance de fuite $R_2/x_n w$ déduite de la relation (10) en fonction de V_0 .

[Variation of the shunt resistance $R_2/x_n w$ as a function of V_0 .]

5. Conclusion.

Nous avons décrit et discuté une méthode simple de mesure d'une résistance de couches déposée sur un substrat non isolant. L'application de cette méthode à la mesure de résistances de couches épitaxiées ou diffusées a permis de vérifier les limites de validité de la méthode utilisée.

Remerciements.

Nous remercions Y. Marfaing pour avoir suggéré ce modèle analytique et nous remercions également J. C. Manificier pour ses remarques et conseils.

Bibliographie

- [1] SMITS F. M., *Bell System Technol. J.* **37** (1958) 711.
- [2] CONVERS Wyeth N., *Solid State El.* **20** (1977) 629.