Classification
Physics Abstracts
75.55F

Caractérisation des niveaux pièges dans les jonctions graduelles P⁺ N Si très dopées Au ou Pt (*)

J. Oualid, J. Gervais, R. Jerisian, A. Lauer et S. Martinuzzi

Laboratoire de Photoélectricité, Faculté des Sciences et Techniques de Marseille St-Jérôme,
13397 Marseille Cedex 4, France

Résumé. — De nombreux travaux ont été consacrés à la caractérisation des niveaux pièges introduits par l'or ou le platine dans le silicium. Pourtant les paramètres caractéristiques de ces niveaux ne sont connus qu'avec une assez grande dispersion surtout en ce qui concerne le platine dans le silicium.

Les résultats présentés ici ont été obtenus sur des jonctions P⁺ N graduelles dont la densité d'impuretés Au ou Pt est du même ordre de grandeur que celle des donneurs.

Plusieurs méthodes de caractérisation des niveaux pièges — capacité en régime transitoire, D.L.T.S., T.C.T.S., spectroscopie d'admittance — ont été mises en œuvre afin de déterminer les taux d'émission thermique de chaque niveau sur le plus grand intervalle de variations possible (10^{-2} s^{-1} à 10^7 s^{-1}), condition pour laquelle les niveaux d'énergie et surtout les sections efficaces de capture peuvent être donnés avec le maximum de précision.

Les résultats confirment que l'or introduit dans le silicium un niveau accepteur de *signature*

$$e_n(T_0/T)^2 = 2,5 \times 10^{12} \exp(-0,546/kT)$$

et un niveau donneur de *signature* $e_p(T_0/T)^2 = 5,1 \times 10^{13} \exp(-0,360/kT)$.

D'autre part le platine introduit aussi dans le silicium deux niveaux principaux, un niveau accepteur de *signature* $e_n(T_0/T)^2 = 10^{13} \exp(-0,230/kT)$, et un niveau donneur de *signature* $e_p(T_0/T)^2 = 6 \times 10^{12} \exp(-0,32/kT)$. Ce dernier niveau, qui est toujours donné avec une très grande imprécision, pourrait être constitué de deux niveaux très rapprochés compris entre 0,30 eV et 0,36 eV. Dans le cas de surcompensation et lorsque le platine est diffusé dans une base de silicium dopé au phosphore, il apparaît un niveau de très faible densité situé à $E_v + 0,42 \text{ eV}$.

Abstract. — Many works have been devoted to the characterisation of trap levels introduced by gold and platinum impurities in silicon. However the parameters of these levels are not well defined specially those assigned to platinum.

The present results were obtained with gradual P⁺ N junctions in which the densities of Au or Pt and donors are of the same order of magnitude.

Several methods of characterisation of trap levels (transient capacitance, D.L.T.S., T.C.T.S., Admittance spectroscopy) were used to determine the thermal emission rate of each trap in a greater range (10^{-2} s^{-1} to 10^7 s^{-1}) in order to obtain accurate values of the activation energies and capture cross sections.

Our results confirm that Au introduces in Si an acceptor and a donor level for which the thermal emission coefficients are : $e_n(T_0/T)^2 = 2,5 \times 10^{12} \exp(-0,546/kT)$; $e_p(T_0/T)^2 = 5,1 \times 10^{13} \exp(-0,360/kT)$.

We have observed that Pt introduces in Si two main levels ; the thermal emission for the acceptor and donor level are respectively : $e_n(T_0/T)^2 = 10^{13} \exp(-0,230/kT)$ and $e_p(T_0/T)^2 = 6 \times 10^{12} \exp(-0,32/kT)$.

The last donor level, always obtained with a small accuracy, may be composed of two very close levels, which could be located between 0.30 and 0.36 eV, above the top of valence band.

In the case of over compensation and when platinum is diffused in a base of phosphor doped silicon, we confirm the existence of a level at $E_v + 0,42 \text{ eV}$ in small concentration.

1. Introduction. — Un nombre considérable de travaux ont été consacrés à l'étude de la caractérisation des niveaux profonds introduits par l'or et le platine dans le silicium. Toutes les techniques de mesure ont été utilisées pour cette caractérisation, des plus

traditionnelles : effet Hall et résistivité [1, 2], photoconductivité [3], transitoire de photocourant [4], courant thermiquement stimulé (T.S.C.) [5]... jusqu'aux plus récentes : transitoire de capacité et D.L.T.S. [6], transitoire de courant et T.C.T.S. [7], spectroscopie d'admittance [8]...

Si les différents résultats obtenus sur le nombre et la position des niveaux d'énergie introduits par

(*) Conférence présentée au Congrès de la Société Française de Physique (Toulouse, 25-30 juin 1979).

l'or dans la bande interdite du silicium sont en bon accord — un niveau accepteur à $E_c - 0,55 \pm 0,01$ eV et un niveau donneur à $E_v + 0,35 \pm 0,01$ eV — il n'en est pas de même en ce qui concerne le platine dans le silicium.

Le nombre de niveaux décelés par les différentes caractérisations du silicium dopé platine varie de 2 [9] à 6 [3] et les données concernant la position de chaque niveau varient considérablement suivant les auteurs. Il est admis néanmoins que le platine donne deux niveaux prépondérants : un niveau accepteur piège d'électrons à $E_c - 0,23$ eV $\pm 0,04$ eV assez bien défini et un niveau donneur à $E_v + 0,32$ eV $\pm 0,06$ eV. De plus, le platine pourrait introduire un autre niveau accepteur piège de trous à $E_v + 0,42$ eV [3, 8, 10, 11] observé aussi par M. D. Miller *et al.* [5] qui disparaîtrait selon ces derniers après un traitement de surface des échantillons.

En ce qui concerne les sections efficaces de capture thermiques, les résultats varient de façon bien plus considérable selon les différents auteurs. C'est ainsi que pour le niveau accepteur de l'or dans le silicium, qui est pourtant le plus étudié et le mieux connu, la section efficace de capture des majoritaires (électrons) varie entre $0,9 \times 10^{-16}$ cm² [13] et 60×10^{-16} cm² [14]. La dispersion est encore plus considérable pour les sections efficaces de capture des minoritaires dont la détermination précise pose un problème de métrologie qui commence juste à trouver une solution satisfaisante [15]. Un problème associé au précédent qui subsiste dans la caractérisation des niveaux profonds dans les semi-conducteurs est celui de l'attribution d'une valeur précise au facteur de dégénérescence g qui caractérise le niveau. Par exemple, suivant les auteurs, g est pris égal à 3/2 [16] ou à 4 [17] pour le niveau accepteur de l'or dans le silicium.

Une des causes majeures d'une telle dispersion des résultats réside dans la grande variété des échantillons étudiés par les différents auteurs qui diffèrent par leur structure (jonctions PN, diodes Schottky), leurs concentrations en impuretés dopantes N_D ou N_A et en centres profonds N_T , les profils de distribution de ces deux types d'impuretés, les tensions de polarisation appliquées. Tous ces paramètres conduisent à une distribution du champ électrique très variable d'un échantillon à l'autre qui peut modifier considérablement les taux d'émission et les sections efficaces de capture (Effets Franz-Keldysh, Poole-Frenkel...).

Pour les applications, en particulier pour la réalisation des diodes à très faible temps de recouvrement, il est indispensable de déterminer les taux d'émission des centres profonds dans les dispositifs. Toutefois, le plus souvent, les modèles théoriques simples qui permettent d'exploiter rapidement les résultats expérimentaux sont assez mal vérifiés en pratique (par exemple : la condition de concentration uniforme et la condition $N_T \ll N_D$ (ou N_A)).

Aussi, nous a-t-il paru intéressant d'appliquer sur des dispositifs réalisés industriellement [18], les méthodes désormais classiques, basées sur l'étude des transitoires de capacité (ou D.L.T.S.) et transitoires de courant (ou T.C.T.S.) ou des variations de la conductance à différentes fréquences en fonction de la température (spectroscopie d'admittance). L'exploitation des résultats a été effectuée simplement même si dans certains cas les hypothèses simplificatrices de base étaient mal vérifiées.

L'objet essentiel de cette caractérisation concerne les diodes silicium P⁺ N dopées platine qui continuent à poser un certain nombre de problèmes aussi bien sur le plan des applications que sur le plan fondamental comme il a été souligné plus haut. Les résultats des diodes dopées à l'or, sur des jonctions identiques, sont donnés aussi à titre de test.

Dans ce travail, à caractère très appliqué, nous avons cherché à déterminer la variation du taux d'émission en fonction de la température T , et à suivre la « signature » de chaque niveau détecté — graphe de $e(300/T)^2 = f(1000/T)$ — sur le plus grand nombre de modules possibles ce qui explique la diversité des méthodes de caractérisation mises en œuvre.

2. Méthodes expérimentales. — Les mesures de taux d'émission ont été effectuées sur plusieurs échantillons, mais chaque série de manipulations a été faite sur 4 diodes P⁺ N de même surface (4,2 mm $\times$ 4,2 mm) collées de façon identique sur la queue en cuivre d'un cryostat de grande inertie afin d'effectuer les enregistrements de transitoire de capacité assez longs, à basses températures. A chaque fois une diode dopée or, 2 diodes dopées platine et une diode non dopée réalisées à partir du même lot de silicium ont été testées successivement par les mêmes méthodes et dans les mêmes conditions.

La diffusion de l'or ou du platine a été effectuée du côté P⁺ sur des diodes réalisées sur un substrat N⁺ d'épaisseur 150 μ m dopé à 3×10^{18} cm⁻³. Les épaisseurs respectives des régions P⁺ et N sont de 20 μ m et 10 μ m. La région N est dopée au phosphore avec une concentration $N_D \simeq 2 \times 10^{14}$ cm⁻³ déterminée par l'étude des graphes $1/C^2 = f(V)$. La région P⁺ présente un profil de dopage très graduel variant de 8×10^{18} cm³ jusqu'à 10^{14} cm⁻³.

Les 2 échantillons dopés platine se caractérisent par la nature du platine déposé initialement et obtenu par des procédés différents. La diffusion du platine pour les 2 types d'échantillon a été effectuée à 925 °C dans les mêmes conditions.

En ce qui concerne les diodes non dopées à l'or ou au platine, aucun niveau profond n'a pu être détecté par aucune des méthodes mises en jeu. Ce qui, par conséquent, implique que les niveaux révélés sur les diodes dopées doivent être attribués effectivement à l'or ou au platine (ou aux impuretés éventuelles des dépôts initiaux).

Les mesures de température sont effectuées à l'aide d'un thermocouple très fin Cuivre-Constantan collé au milieu des 4 diodes. Une thermistance étalonnée de platine, noyée dans la queue du cryostat, le plus près possible de la surface est utilisée pour la régulation de la température. La température une fois stabilisée est mesurée de façon identique par les 2 détecteurs.

Les transitoires de capacité et les spectres D.L.T.S. ont été enregistrés à l'aide d'un pont de capacité PAR 410 de constante de temps inférieure à 1 ms et d'un BOXCAR PAR 162 équipé de 2 préamplificateurs 164 qui permettent la mesure de la capacité en 2 instants t_1 et t_2 différents.

Les transitoires de courant et les spectres T.C.T.S. sont enregistrés à l'aide d'un Boxcar seul.

Les spectres d'admittance (capacité et conductance) sont réalisés à l'aide d'un double détecteur synchrone PAR 5204.

3. Diodes P⁺ N Si dopées Au. — Les diverses méthodes de caractérisation mises en jeu concourent à donner des taux d'émission thermique correspon-

Fig. 1. — Signature des pièges introduits par l'or dans les diodes P⁺ N graduels Si. × : Transitoires de capacité; ○ : D.L.T.S.; ■ : T.C.T.S.; ■ : Spectroscopie d'admittance; ○ : Sah [31]; ★ : Brotherton [19]; ☆ : Engström [7]; A : niveau accepteur d'énergie $E_c - E_T = 0,546$ eV; D : niveau donneur d'énergie $E_T - E_v = 0,36$ eV.

[Temperature corrected thermal emission coefficients of traps introduced by gold in graduate P⁺ N Si diodes: × : Capacitance transients; ○ : D.L.T.S.; ■ : T.C.T.S.; ■ : admittance spectroscopy; ○ : Sah [31]; ★ : Brotherton [19]; ☆ : Engström [7]; A : Acceptor level at $E_c - E_T = 0,546$ eV; D : Donor level at $E_T - E_v = 0,36$ eV ($t_1 = 2$ ms; $t_2 = 8$ ms; $V_R = 10$ V).]

dant au niveau accepteur et au niveau donneur de l'or dans le silicium qui sont en assez bon accord avec ceux déjà publiés (voir Fig. 1 et Tableau I) et ceci malgré les distributions complexes d'impuretés des diodes étudiées.

Tableau I. — Signature $e(T_0/T)^2$ des niveaux de l'or dans le silicium (e : taux d'émission thermique des majoritaires).

[Temperature corrected thermal emission coefficients of gold trap levels in silicon (e : majority carriers thermal emission rate).]

Niveau	Sah [19]	Nos résultats
A	$1,6 \times 10^{12} \exp\left(-\frac{0,547}{kT}\right)$	$2,5 \times 10^{12} \exp\left(-\frac{0,546}{kT}\right)$
D	$2,5 \times 10^{13} \exp\left(-\frac{0,345}{kT}\right)$	$5,1 \times 10^{13} \exp\left(-\frac{0,360}{kT}\right)$

Le niveau donneur situé au-dessous du niveau d'énergie intrinsèque peut se manifester (Fig. 2) parce que la concentration dans la région P⁺ des diodes étudiées est très graduelle. Effectivement, on observe une variation linéaire de C^{-3} en fonction de la tension inverse lorsque celle-ci est inférieure à 8 V.

Fig. 2. — Spectre D.L.T.S. caractéristique des diodes graduels P⁺ N Si dopées Au ($t_1 = 2$ ms, $t_2 = 8$ ms, $V_R = 10$ V).

[Typical experimental D.L.T.S. spectrum of graduate Au doped P⁺ N Si diodes ($t_1 = 2$ ms; $t_2 = 8$ ms, $V_R = 10$ V).]

Du fait des gradients de concentration et des forts champs électriques qui en résultent, les taux d'émission thermique mesurés sont légèrement supérieurs à ceux obtenus précédemment par d'autres auteurs sur des structures plus simples (Schottky ou jonctions abruptes).

4. Diodes P⁺ N Si dopées Pt. — 4.1 TRANSITOIRES DE CAPACITÉ. — Les transitoires de capacité des diodes P⁺ N Si dopées Pt type 2p sont de faible

amplitude ($C(\infty) - C(0) \simeq 1$ pF) et pratiquement exponentiels.

La densité des niveaux pièges responsables de ces transitoires de capacité au voisinage de la température ambiante est très faible, 100 fois plus faible que la densité des impuretés dopantes. Il a été impossible d'observer des transitoires de capacité au voisinage de la température ambiante pour des diodes Si dopées Pt type 20p.

La concentration très faible de pièges,

$$N_T \simeq 10^{12} \text{ cm}^{-3},$$

responsable des transitoires de capacité (à $T \simeq 300$ K) observés sur les seules diodes 2p prouverait que ces pièges sont dus à une impureté du dépôt initial de platine du type 2p, ce qui sera confirmé au paragraphe suivant.

4.2 D.L.T.S. — Les spectres D.L.T.S. sont caractérisés comme le montre la figure 3 par deux pics de hauteur voisine dans le cas des diodes 2p (courbe 1) et par un seul pic notable dans le cas des diodes 20p (courbe 2).

Fig. 3. — Spectres D.L.T.S. caractéristiques des diodes $P^+ N$ Si dopées Pt type 2p. type 2p (courbe 1) et 20p (courbe 2). $t_1 = 2$ ms, $t_2 = 8$ ms, $V_R = 9$ V.

[Typical experimental D.L.T.S. spectrums of graduate Pt doped $P^+ N$ Si diodes. 2p type : curve 1 ; 20p type curve 2 ; $t_1 = 2$ ms ; $t_2 = 8$ ms ; $V_R = 9$ V.]

Il n'est pas possible d'explorer les niveaux pour des températures inférieures à -100 °C pour lesquelles le signal D.L.T.S. s'effondre brutalement (Fig. 3) à cause du phénomène de surcompensation ; c'est ce qui limite l'exploration sur un seul module du niveau F commun aux deux types de diodes (Fig. 4). La nomenclature des pièges Pt dans Si adoptée est celle proposée par Evwaraye *et al.* [21].

La signature du niveau F est donnée par :

$$e_p^F = (5,0 \pm 0,5) 10^{13} \left(\frac{T}{300} \right)^2 \exp \left(-\frac{0,42}{kT} \right).$$

Fig. 4. — Signatures des niveaux pièges révélés dans les diodes graduées $P^+ N$ Si dopées Pt. ☆ : Transitoire de capacité diodes 2p ; □ : D.L.T.S. diodes 2p ; Δ : D.L.T.S. diodes 20p ; ★ : T.C.T.S. diodes 2p ; ○ : T.C.T.S. diodes 20p (niveau E') ; ● : T.C.T.S. diodes 20p (niveau E''). A : niveau accepteur d'énergie $E_c - E_T = 0,230$ eV ; E : niveau donneur d'énergie $E_T - E_v = 0,34$ eV ; F : niveau accepteur d'énergie $E_T - E_v = 0,42$ eV ; I : niveau non identifié : $E_T = 0,54$ eV par rapport à la bande la plus proche.

[Temperature corrected thermal emission coefficients of displayed traps levels in graduate Pt doped $P^+ N$ Si diodes. ☆ : Capacitance transient 2p diodes ; Δ : D.L.T.S. on 2p diodes ; □ : D.L.T.S. on 20p diodes ; ★ : T.C.T.S. on 2p diodes ; ○ : T.C.T.S. on 20p diodes (E' level) ; ● : T.C.T.S. on 20p diodes (E'' level) ; A : acceptor level at $E_c - E_T = 0,230$ eV ; E : donor level at $E_T - E_v = 0,34$ eV ; F : acceptor level at $E_T - E_v = 0,42$ eV ; I : unknown level at $E_T = 0,54$ eV from the nearer band.]

Le terme préexponentiel est respectivement 5 et 30 fois plus petit que celui donné par A. O. Evwaraye *et al.* [21] et K. P. Lisiak *et al.* [8] pour le même niveau d'énergie : 0,42 eV (Tableau II). Ce niveau s'observe ici exactement dans les conditions définies par ces derniers auteurs, c'est-à-dire dans le cas d'une base de silicium de type N dopée au phosphore très compensée en platine ; ce qui confirmerait que ce niveau pourrait être attribué à une impureté complexe platine-phosphore. D'après Lisiak [8] il s'agirait d'un niveau accepteur situé à 0,42 eV au-dessus de la bande de valence.

La concentration des pièges sur ce niveau d'énergie est très faible et du même ordre de grandeur que celle donnée au paragraphe 4.1 pour le niveau I qui ne s'observe que pour les diodes 2p.

Tableau II. — Signature $e(T_0/T)^2$ des niveaux de Pt dans Si (e : taux d'émission thermique des majoritaires).[Temperature corrected thermal emission coefficients of platinum trap levels in silicon (e : majority carrier thermal emission rate).]

Niveau	Pals [9]	Lisiak <i>et al.</i> [8]	Evwaraye <i>et al.</i> [21]	Nos résultats
A	$8 \times 10^{11} \exp\left(-\frac{0,230}{kT}\right)$	$10^{10} \exp\left(-\frac{0,192}{kT}\right)$	$2 \times 10^{12} \exp\left(-\frac{0,23}{kT}\right)$	$9 \times 10^{12} \exp\left(-\frac{0,228}{kT}\right)$ (2p) $1,8 \times 10^{13} \exp\left(-\frac{0,233}{kT}\right)$ (20p)
E	$10^{12} \exp\left(-\frac{0,317}{kT}\right)$	$3 \times 10^{10} \exp\left(-\frac{0,260}{kT}\right)$	$5,5 \times 10^{12} \exp\left(-\frac{0,33}{kT}\right)$	$6 \times 10^{12} \exp\left(-\frac{0,316}{kT}\right)$ (2p) $2 \times 10^{14} \exp\left(-\frac{0,36}{kT}\right)$ E' 1 (20p) $3 \times 10^{13} \exp\left(-\frac{0,34}{kT}\right)$ E'' 1
F		$1,5 \times 10^{15} \exp\left(-\frac{0,420}{kT}\right)$	$2,4 \times 10^{14} \exp\left(-\frac{0,41}{kT}\right)$	$5 \times 10^{13} \exp\left(-\frac{0,42}{kT}\right)$

La signature de ce dernier niveau est donnée par :

$$e^I = 1,6 \times 10^{12} \left(\frac{T}{300}\right)^2 \exp\left(-\frac{0,544}{kT}\right).$$

Cette signature est très semblable à celle donnée par Sah pour le niveau accepteur de l'or dans le silicium (Tableau I). Peut-on alors assimiler le niveau I au niveau A de l'or ? La conclusion n'est pas évidente parce qu'un très grand nombre d'impuretés (Fe, Cu, Mn, Zn, ...) donnent comme l'or un niveau situé à 0,54 eV-0,55 eV au-dessous de la bande de conduction [22]. Il est très vraisemblable toutefois qu'il s'agit d'un niveau dû à une impureté autre que le platine et non pas à un niveau thermique puisque les 2 types de diodes ont subi le même traitement thermique.

4.3 T.C.T.S. — Les spectres T.C.T.S. sont caractérisés (Fig. 5) par deux pics. Le premier, repéré par la lettre A, est relativement bien résolu. Il correspond certainement au niveau piège d'électrons de type accepteur caractéristique du platine dans le silicium.

En effet, la signature correspondante est donnée par : — diodes 20p :

$$e_n^A = 1,8 \times 10^{13} \left(\frac{T}{300}\right)^2 \exp\left(-\frac{0,233}{kT}\right)$$

— diodes 2p :

$$e_n^A = 0,9 \times 10^{13} \left(\frac{T}{300}\right)^2 \exp\left(-\frac{0,232}{kT}\right).$$

Le second pic repéré par la lettre E est beaucoup plus large et la température du maximum est déterminée avec beaucoup plus d'imprécision. Pour des fenêtres de temps supérieures à 10 μ s, il semble bien que le pic E de la diode 20p soit, en fait, comme le

Fig. 5. — Spectres T.C.T.S. caractéristiques des diodes graduées P⁺ N Si dopées Pt : type 2p (courbe 1 : $t_1 = 2 \mu$ s, $t_2 = 8 \mu$ s ; $V_R = 9$ V) ; type 20p (courbe 2 : $t_1 = 4 \mu$ s, $t_2 = 16 \mu$ s ; $V_R = 9$ V).

[Typical experimental T.C.T.S. of graduate Pt doped P⁺ N Si diodes : 2p type : curve 1 ($t_1 = 2$ ms ; $t_2 = 8$ ms ; $V_R = 9$ V) ; 20p type : curve 2 ($t_1 = 4 \mu$ s ; $t_2 = 16 \mu$ s ; $V_R = 9$ V).

montre la figure 5, constitué par la contribution de deux niveaux très proches dont les signatures sont données par :

$$e_p^{E'} = 2,7 \times 10^{13} \left(\frac{T}{300}\right)^2 \exp\left(-\frac{0,345}{kT}\right)$$

$$e_p^{E''} = 1,8 \times 10^{14} \left(\frac{T}{300}\right)^2 \exp\left(-\frac{0,364}{kT}\right).$$

Cette observation confirmerait les résultats donnés par Carchano [2] qui trouve deux niveaux très rapprochés situés à 0,30 et 0,36 eV.

Pour la diode 2p, le pic est tout aussi large mais la séparation des deux niveaux est beaucoup moins nette. La signature du niveau E est représentée par

$$e_p^E = 6,3 \times 10^{12} \left(\frac{T}{300}\right)^2 \exp\left(-\frac{0,316}{kT}\right).$$

Ce résultat est en assez bon accord avec celui donné par ailleurs [9] si on assimile le niveau E au niveau donneur du platine. Cette attribution est justifiée par les résultats obtenus par spectroscopie d'admittance donnés ci-dessous. Ce niveau E s'observe très bien même dans les structures P^+N graduelles étudiées à cause de la très forte concentration du platine sur ce niveau. Evwaraye [21] donne un rapport de concentrations du platine sur ce niveau donneur E et sur le niveau accepteur A égal à $4,25/0,62 \simeq 7$.

4.4 SPECTROSCOPIE D'ADMITTANCE. — Les spectres d'admittance comme les spectres T.C.T.S. sont caractérisés par 2 pics, l'un à basse température, relativement bien défini, qui correspond au niveau accepteur A , l'autre à plus haute température, très large, correspondant au niveau donneur E . La figure 6 montre comment la hauteur et la position de ces 2 pics de conductance mesurée à la fréquence 1 MHz varient en fonction de la polarisation inverse.

Fig. 6. — Spectres de conductance à 1 MHz des diodes graduelles P^+N Si dopées Pt type 2p : 1 : $V_R = 0$ V ; 2 : $V_R = 2$ V ; 3 : $V_R = 5$ V ; 4 : $V_R = 10$ V ; 5 : $V_R = 20$ V.

[Conductance spectrum at 1 MHz of graduate Pt doped P^+N 2p type Si diodes : 1 : $V_R = 0$ V ; 2 : $V_R = 2$ V ; 3 : $V_R = 5$ V ; 4 : $V_R = 10$ V ; 5 : $V_R = 20$ V.]

De façon générale, la hauteur des pics diminue lorsque la tension de polarisation inverse augmente. De plus, le pic E tend à disparaître complètement pour les grandes tensions de polarisation inverse de la même façon que le pic correspondant au niveau donneur de l'or. Cette observation s'interprète bien en attribuant, pour origine au niveau E , le niveau piège de trous de type donneur du platine qui se révèle dans la région graduelle P^+ de la jonction. Lorsque la tension inverse augmente, le rapport des largeurs de la charge d'espace dans les régions N et P^+ augmente ce qui, par conséquent, privilégie le niveau A par rapport au niveau D .

Contrairement à ce qui a été remarqué pour les

diodes dopées Au, la position des pics A et E de conductance des diodes P^+N dopées au platine se déplace vers les faibles températures lorsque la tension de polarisation augmente (Fig. 6) ; ce qui s'expliquerait par l'action du champ électrique important dans ces diodes graduelles, dont la valeur maximale est supérieure à 10^5 V/cm.

4.5 RÉCAPITULATION DES RÉSULTATS OBTENUS SUR LES DIODES P^+N Si DOPÉES Pt. — Les spectres T.C.T.S. et de spectroscopie d'admittance ont permis de confirmer que les niveaux principaux introduits par le platine dans le silicium quelle qu'en soit l'origine sont le niveau accepteur A situé à $E_c - 0,230$ eV $\pm 0,003$ eV et le niveau donneur E situé à $E_v + 0,34$ eV $\pm 0,02$ eV. Ce dernier niveau pourrait être constitué en fait par deux niveaux E' et E'' très rapprochés ce qui confirme les observations faites par d'autres auteurs avec d'autres méthodes [2], [3]. Les sections efficaces de capture obtenues sont supérieures à celle données par ailleurs ; ce qui pourrait s'expliquer par les très forts gradients de concentration des structures étudiées et par les très forts champs électriques associés.

Les spectres D.L.T.S. font apparaître un niveau F situé à $E_v + 0,42$ eV, de densité très faible, déjà observé par de nombreux auteurs lorsque le platine est diffusé comme dans le cas des diodes étudiées dans une base N dopée au phosphore et dans le cas de forte surcompensation. Ces spectres révèlent, uniquement dans le cas des diodes de type 2p, un niveau I inconnu qui présente la même *signature* que celle du niveau accepteur de l'or dans le silicium.

5. Conclusions. — Les techniques D.L.T.S. et T.C.T.S. ont permis de retrouver certains résultats déjà obtenus concernant les niveaux introduits par l'or et le platine dans le silicium. Elles ont été pourtant appliquées sur des structures qui ne vérifient pas toujours les hypothèses des modèles théoriques qui permettent une interprétation simple des résultats. Les structures étudiées présentent en effet un gradient de concentration important et une forte compensation dans le cas des diodes dopées au platine. Les forts champs électriques des structures graduelles étudiées ont conduit, généralement, à des déterminations de taux d'émission thermique supérieurs à ceux donnés par d'autres auteurs à la même température.

Par contre, la technique de spectroscopie d'admittance conduit, dans ces conditions, à des interprétations délicates et complexes.

Ce travail confirme que les niveaux introduits par l'or dans le silicium sont situés à $E_c - 0,545$ eV ($\pm 0,005$ eV) et à $E_v + 0,35$ eV ($\pm 0,01$ eV). Les niveaux prépondérants introduits par le platine dans le silicium sont situés à $E_c - 0,230$ eV ($\pm 0,005$ eV) et à $E_v + 0,33$ eV ($\pm 0,03$ eV). La grande imprécision

de la mesure de ce dernier niveau est certainement due à la compétition de 2 niveaux très rapprochés.

Un niveau, plus faible en concentration, situé à $E_v + 0,42 \text{ eV} (\pm 0,01 \text{ eV})$ a été confirmé dont l'origine pourrait être attribuée à une impureté complexe platine-phosphore.

Remerciements. — Les auteurs tiennent à remercier la Société THOMSON-SESCOSEM d'Aix-en-Provence pour la fourniture des échantillons et particulièrement M. Lhorte pour les très utiles discussions dans lesquelles il nous a fait part de sa parfaite connaissance des dispositifs étudiés.

Bibliographie

- [1] COLLINS, C. B., CARLSON, R. D., GALLAGHER, C. J., *Phys. Rev.* **105** (1957) 1168.
- [2] CARCHANO, H., JUNDT, C., *Solid State Electron.* **13** (1970) 83.
- [3] AKHMEDOVA, M. M., LEBEDEV, A. A., MAKHKAMOV, Sh., *Sov. Phys. Semicond.* **9** (1976) 861.
- [4] SAH, C. T., TASCH, A. F. Jr., SCHRODER, D. K., *Phys. Rev. Lett.* **19** (1967) 71.
- [5] MILLER, M. D., SCHADE, H., NUESE, C. J., *J. Appl. Phys.* **47** (1976) 2569.
- [6] YAU, L. D., SAH, C. T., *Appl. Phys. Lett.* **21** (1972) 157.
- [7] ENGSTRÖM, O., GRIMMEISS, H. G., *J. Appl. Phys.* **46** (1975) 831.
- [8] LISIAK, K. P., MILNES, A. G., *J. Appl. Phys.* **46** (1975) 5229.
- [9] PALS, J. A., *Solid State Electron.* **17** (1974) 1139.
- [10] WOODBURY, H. H., LUDWIG, G. W., *Phys. Rev.* **126** (1962) 466.
- [11] GLINCHUK, K. D., LITOVCHENKO, N. M., *Sov. Phys. Solid State* **6** (1965) 2963.
- [12] BRAUN, S., GRIMMEISS, H. G., *J. Appl. Phys.* **48** (1977) 3883.
- [13] BROTHERTON, S. D., BICKNELL, J., *J. Appl. Phys.* **49** (1978) 667.
- [14] ZOHTA, Y., *J. Appl. Phys.* **43** (1972) 1713.
- [15] BRUNWIN, R., HAMILTON, B., JORDAN, P., PEAKER, A. R., *2^e Lundt International Conference on deep level impurities in semi-conductors 7* (Sainte Maxime, France), 10 mai 1979.
- [16] BULLIS, W. M., STRIETER, F. J., *J. Appl. Phys.* **39** (1968) 672.
- [17] RALPH, H. I., *J. Appl. Phys.* **49** (1978) 672.
- [18] Dispositifs réalisés par la THOMSON-SESCOSEM d'Aix-en-Provence.
- [19] SAH, C. T., FORBES, L., ROSIER, L. T., TASCH, A. E., TOLE, A. B., *Appl. Phys. Lett.* **15** (1969) 145.
- [20] SAH, C. T., *I.E.E.E. Trans. Electron Devices* **24** n° 4 (April 1977).
- [21] EVWARAYE, A. O., SUN, E., *J. Appl. Phys.* **47** (1976) 3172.
- [22] MILNES, A. G., *Deep Impurities in Semiconductors* (John Wiley and Sons) 1973.