



**HAL**  
open science

## Réalisation et caractérisation de contacts ohmiques sur diamant CVD

de Fabian Gabriel Civrac, Henri Schneider, Hui Ding, Karine Isoird, J. Achard

► **To cite this version:**

de Fabian Gabriel Civrac, Henri Schneider, Hui Ding, Karine Isoird, J. Achard. Réalisation et caractérisation de contacts ohmiques sur diamant CVD. XIIème colloque Electronique de Puissance du Futur (EPF 2008), Jul 2008, TOURS, France. 5 p. hal-01002267

**HAL Id: hal-01002267**

**<https://hal.science/hal-01002267>**

Submitted on 5 Jun 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Réalisation et caractérisation de contacts ohmiques sur diamant CVD

G. Civrac<sup>1</sup>, H. Schneider<sup>1</sup>, H. Ding<sup>2,3</sup>, K. Isoird<sup>2,3</sup>, J. Achard<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Université de Toulouse ; INPT ; LAPLACE ; 2 rue C. Camichel F-31071 Toulouse, France

<sup>2</sup> CNRS ; LAAS ; 7 avenue du colonel Roche, F-31077 Toulouse, France

<sup>3</sup> Université de Toulouse ; UPS

<sup>4</sup> CNRS ; LIMHP ; avenue J.B. Clément F-93430 Villetaneuse, France

*Dans ce papier, nous présentons nos travaux concernant la fabrication et la caractérisation de contacts ohmiques sur diamant CVD. La première partie fait état de nos avancées concernant le dopage du diamant par implantation ionique de bore. Ensuite, nous présentons les contacts ohmiques que nous avons déposés et caractérisés par méthode TLM. Les deux technologies envisagées, Ti/Pt/Au et Si/Al, donnent des résistances caractéristiques de contact compatibles avec une utilisation en électronique de puissance, de l'ordre de  $1.10^{-5} \Omega \text{cm}^2$ . La troisième partie traite de nos avancées dans la mise au point d'une plate-forme de simulation des dispositifs en diamant.*

## I. INTRODUCTION

Les matériaux grand gap permettent de repousser les limites d'applications des composants d'électronique de puissance, notamment en terme de température d'utilisation ou de tenue en tension. Le diamant a une bande interdite de 5,7 eV [1], ce qui autorise une utilisation à haute température. Son champ de rupture de 10 MV/cm permet la tenue de tensions très importantes. Sa conductivité thermique exceptionnelle (20 W/cm.K) permet une bonne évacuation de la chaleur. Enfin, il possède de très bonnes mobilités des porteurs électriques [2]. Ces propriétés en font un candidat idéal pour l'électronique de puissance, particulièrement pour des applications haute température et/ou haute tension.

Les récentes avancées dans le domaine de la synthèse de substrats de diamant CVD ont permis de fabriquer des substrats de qualité compatible avec la micro électronique.

La réalisation de contacts ohmiques performants, c'est à dire ayant une caractéristique I(V) linéaire et une faible résistance, est une condition nécessaire à la fabrication de bons dispositifs de puissance. Pour cela, il est nécessaire de déposer les contacts sur du diamant suffisamment dopé. En effet, le dépôt d'un métal sur le diamant provoque la création d'une barrière de potentiel élevée à l'interface. Un fort dopage de la couche de semi-conducteur permet d'affiner cette barrière, ce qui favorise le passage des porteurs électriques par effet tunnel [3].

Nous présentons premièrement nos travaux concernant le dopage du diamant par implantation ionique de Bore.

Puis, nous exposons les techniques que nous mettons en œuvre pour déposer, puis caractériser des contacts ohmiques sur des couches de diamant fortement dopées.

Enfin, nous exposons les avancées menées dans la mise en place d'une plate-forme de simulation performante, qui permettrait de concevoir plus précisément les dispositifs à base de diamant.

## II. LE DOPAGE PAR IMPLANTATION IONIQUE DE BORE

A ce jour, le dopage reste un verrou technologique majeur [4].

Le dopage n n'est pas encore maîtrisé, le phosphore, donneur le plus couramment utilisé, ayant un niveau d'ionisation trop profond (0,6 eV). Ce niveau d'ionisation ne garantit pas de concentration suffisante de porteurs libres à température ambiante.

Le dopage p fait généralement intervenir le bore, dont l'énergie d'ionisation dans le diamant vaut 0,36 eV. Les résultats les plus concluants concernent le dopage in-situ, au cours de la croissance du diamant. Le dopage par diffusion ne fonctionne pas car les coefficients de diffusion des dopants dans le diamant sont bien trop faibles. En ce qui nous concerne, nous travaillons sur le dopage p par implantation ionique. L'implantation ionique a l'avantage d'être une technique plus souple que les techniques de dopage in-situ ou par diffusion, permettant de réaliser des dopages localisés et ayant des concentrations précises. Elle est indispensable à la conception de dispositifs avancés.

Toutefois, l'implantation dans le diamant est délicate. L'une des difficultés majeures provient du fait que le diamant, aux conditions normales de température et de pression, est une phase métastable du carbone. Lors du recuit post-implantation, une couche trop endommagée se recristallise en phase graphitique, perdant ainsi la plupart des propriétés intéressantes du diamant. La densité critique de défauts vaut  $D_c = 1.10^{22} \text{ cm}^{-3}$  [5]. De nombreuses études sont donc menées pour minimiser la concentration de défauts créés dans le cristal [6] ou pour trouver des conditions de recuit favorisant la recristallisation du diamant [7]. Le recuit post implantation lui-même n'est pas aisé. En effet, à haute température, le diamant réagit avec l'oxygène pour former du  $\text{CO}_2$ . Les recuits post-implantation sont donc généralement effectués dans des conditions de vide poussé.

La méthode que nous utilisons consiste à encapsuler les échantillons de diamant dans une couche de silicium. Cette couche permet, d'une part, de limiter la création de défauts

dans la couche de diamant lors de l'implantation, et d'autre part, d'isoler le diamant de l'atmosphère lors du recuit. Elle peut, en outre, être utilisée par la suite pour créer des contacts Si/Al sur l'échantillon.

Ici, nous avons encapsulé l'échantillon de diamant dans une couche silicium de 100 nm d'épaisseur, déposée par PECVD (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition), méthode permettant de faire le dépôt à une température suffisamment faible pour ne pas provoquer la combustion de l'échantillon. Ensuite, nous avons effectué l'implantation ionique à une énergie de 100 keV, à température ambiante et en utilisant un faible courant d'implantation. Enfin, l'échantillon a été recuit par méthode RTP (Rapid Thermal Process) durant 20 secondes.

La figure 1 montre le profil SIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy) effectué après retrait de la couche de silicium, ainsi que la simulation SRIM de l'implantation à travers la couche tampon. Les deux courbes concordent bien, notamment en ce qui concerne la forme du pic d'implantation. Cette comparaison est possible car nous avons, au préalable, vérifié que la température de recuit utilisée n'entraîne pas de diffusion des dopants dans le diamant.

Il faut toutefois noter que le simulateur SRIM considère des implantations dans des matériaux amorphes. Or, l'énergie nécessaire au déplacement d'un atome de carbone ou le pouvoir d'arrêt du matériau varie selon sa cristallinité. Un travail de paramétrage du simulateur a donc été mené auparavant.

Le pic de concentration de Bore présent, sur le profil SIMS, juste sous l'interface silicium/diamant est en réalité une erreur de mesure commise par le SIMS.

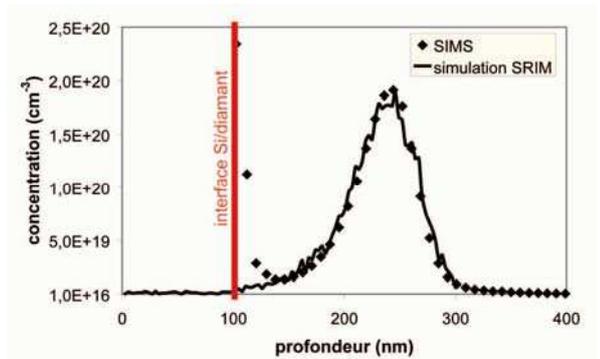


Figure 1 : profil SIMS et simulation SRIM du bore incorporé dans l'échantillon par implantation ionique

Après le recuit post-implantation, la surface de l'échantillon est bien devenue conductrice.

La figure 2 présente l'allure d'une conductance mesurée à la surface de l'échantillon en fonction de l'inverse de la température. La pente de la courbe révèle une énergie d'activation des atomes de Bore de 0.3 eV. Cette énergie d'activation révèle une concentration de dopants activés d'environ  $2.10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

L'échantillon a ensuite été plongé dans un bain d'acide sulfochromique chaud. Sa résistivité n'a pas varié, prouvant

que le phénomène de graphitisation du diamant n'a pas eu lieu.

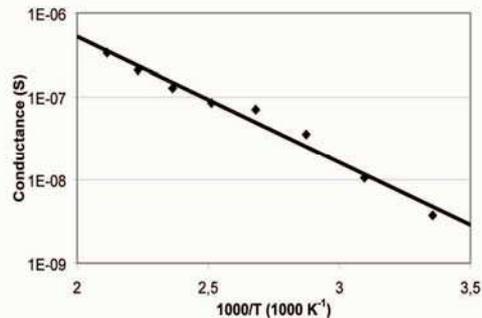


Figure 2 : conductance en fonction de l'inverse de la température

### III. LE DEPOT ET LA CARACTERISATION DE CONTACTS OHMIQUES

Pour le moment, les contacts déposés sur les couches de diamant que nous avons dopées par implantation ont des caractéristiques courant-tension symétriques mais pas linéaires. Ceci révèle un dopage insuffisant en surface. De nouvelles implantations seront prochainement menées pour tenter d'incorporer les atomes dopants à des profondeurs moindres.

Nos études concernant les contacts ohmiques sont donc effectuées sur des couches très fortement dopées bore lors de la croissance (dopage in-situ). Le dopage est de l'ordre de  $3.10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . Ces couches ont été synthétisées sur des substrats de diamant HPHT isolants.

Nous avons testé deux technologies de contacts distinctes, des contacts Ti/Pt/Au et des contacts Si/Al.

#### A. Les contacts Ti/Pt/Au

La premiers contacts testés sont des contacts Ti/Pt/Au, souvent utilisés dans la littérature. Le titane a la propriété de réagir avec le diamant, lors du recuit des contacts, pour créer du carbure de titane. Ceci promet l'accroche du contact, ainsi que son ohmicité. L'or est utilisé pour permettre un éventuel assemblage de l'échantillon. Le platine sert de barrière de diffusion de l'or.

La figure 3 présente les motifs de test TLM [8] utilisés pour caractériser les contacts Ti/Pt/Au. Son originalité réside dans le rapport élevé de la longueur de contact  $W$  sur l'espacement inter-contacts  $L_i$ . De cette manière, on peut faire l'hypothèse que les lignes de courant circulant d'un contact à l'autre sont parallèles, condition nécessaire à l'extraction des résultats. Ici, nous avons  $L_1 = 5 \mu\text{m}$ ,  $L_2 = 10 \mu\text{m}$ ,  $L_3 = 20 \mu\text{m}$ ,  $L_4 = 40 \mu\text{m}$ , pour  $W = 400 \mu\text{m}$ . La largeur de contact vaut  $L_C = 10 \mu\text{m}$ . Une couche de  $\text{SiO}_2$ , préalablement déposée sur l'échantillon de diamant par PECVD. Des tranchées effectuées par gravure RIE (Reactive Ion Etching) permettent de découpler la taille effective des contacts sur le semi-conducteur de la taille des métallisations déposées. Ceci est important car les métallisations doivent être suffisamment grandes pour pouvoir effectuer des tests électriques sous pointes. Les métaux sont ensuite déposés par lift-off. Ils sont enfin recuits à  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  pendant une heure.

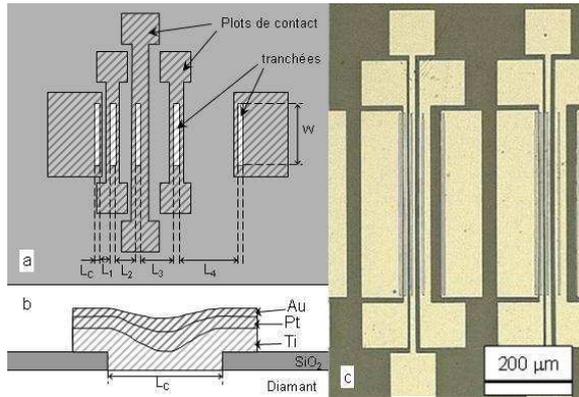


Figure 3 : a) schéma du motif de test TLM utilisé. b) coupe schématique des contacts. c) photographie des structures réalisées

Après recuit les contacts sont ohmiques. La caractéristique  $R(L)$  est très linéaire (fig. 4). La pente vaut :

$$p = \frac{R_{SH}}{W} \quad (1)$$

où  $R_{SH}$  est la résistance par carré de la couche de semi-conducteur caractérisée.

L'ordonnée à l'origine vaut :

$$R(L = 0) = 2R_C \quad (2)$$

où  $R_C$  est la résistance d'un contact.

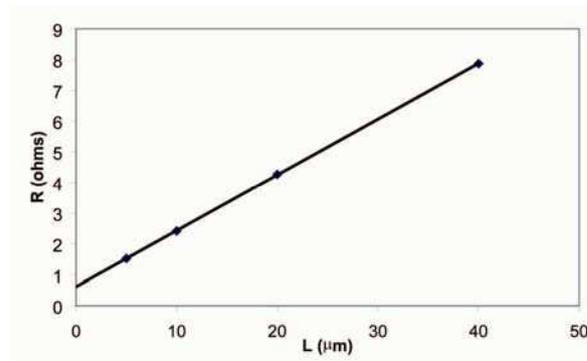


figure 4 : caractéristique extraite des mesures effectuées sur le motif de test TLM

Les données extraites de ces mesures nous donnent une résistivité de contact valant  $\rho_C = 1.10^{-5} \Omega.cm^{-2}$ . Ceci est compatible avec une utilisation en électronique de puissance.

### B. Les contacts Si/Al

Ce type de contact a été caractérisé de manière à vérifier la faisabilité de l'utilisation de la couche de silicium déposée durant le processus d'implantation pour fabriquer des contacts ohmiques. Toutefois, les implantations n'ont, pour le moment, pas permis d'incorporer des concentrations suffisantes de bore en substitution. Nous avons donc testé les contacts Si/Al sur la couche de diamant utilisée pour caractériser les contacts Ti/Pt/Au. Ceci permet de comparer les deux techniques.

Cette fois, nous avons réalisé un motif de test plus traditionnel, faisant intervenir une gravure d'isolation de la zone de test. La figure 5 est une photographie MEB du motif de test terminé.

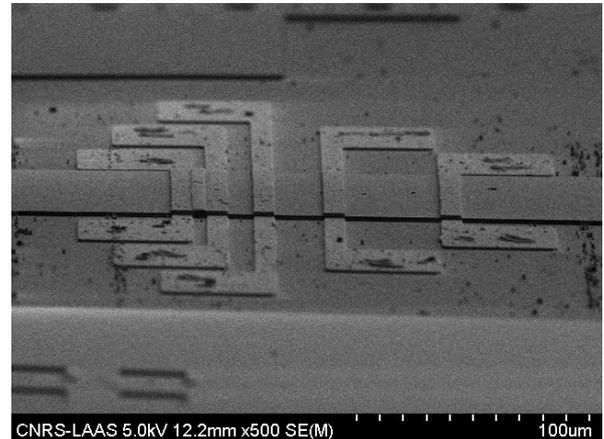


Figure 5 : photographie MEB du motif de test TLM Al/Si

Le process technologique utilisé est le suivant :

- Dépôt d'une couche de silicium fortement dopée bore par PECVD.
- Recuit RTP : 1200 °C, 20 secondes.
- Dépôt Ti/Au (500 Å / 2000 Å) par lift-off. Le métal ainsi déposé servira de masque de gravure pour les étapes suivantes
- Gravure RIE de la couche de silicium
- Gravure RIE de la couche de diamant p+, jusqu'au substrat HPHT. La figure 6 présente une photographie MEB d'un des flancs de gravure réalisés. Les flancs sont très verticaux. On peut noter une légère surgravure, caractéristique d'une gravure énergétique.
- Retrait du masque de gravure par attaque chimique : KI+I2 puis HF.
- Dépôt des contacts aluminium (5000 Å) par lift-off.
- Gravure RIE du silicium présent entre les contacts. Les contacts déposés précédemment servent de masques de gravure.
- Recuit des contacts : 450 °C, 20 minutes.

Les deux premières étapes sont réalisées dans des conditions très proches des dépôts de silicium précédents une implantation ionique et du recuit post-implantation.

Les contacts ainsi fabriqués ont une caractéristique  $I(V)$  linéaire. Ils ont une résistance caractéristique de l'ordre de  $1.10^{-5} \Omega.cm^{-2}$ , tout comme les contacts Ti/Pt/Au testés précédemment.

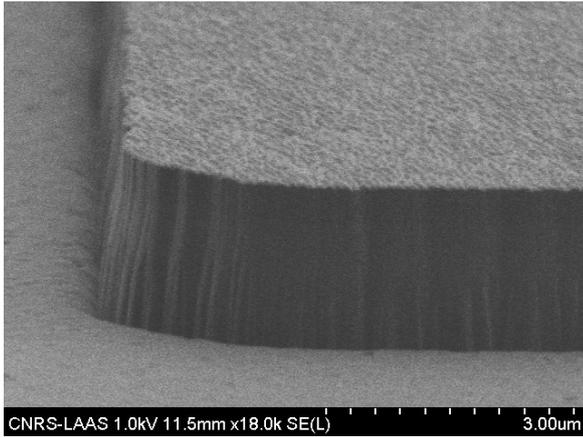


Figure 6 : photographie MEB d'un profil de gravure RIE

#### IV. MISE EN PLACE D'UNE PLATE-FORME DE SIMULATION

Comme l'a démontré le développement de la filière silicium, il est nécessaire de développer une base de simulation avec des outils tel que SENTAURUS TCAD pour concevoir les composants du futur à base de diamant.

La simulation avec le logiciel SENTAURUS TCAD est basée sur la résolution d'équations du semiconducteur (Equation de continuité des électrons et des trous et équation de poisson). Pour cela, il est nécessaire de s'appuyer sur des modèles physiques et des paramètres décrivant notamment le transport de charges dans le matériau. L'objectif est donc, dans un premier temps, de constituer un fichier de paramètres dont les valeurs sont issues de la littérature, afin de réaliser les premières simulations. Une large étude bibliographique a permis de déterminer certains paramètres tels que la largeur de bande interdite ( $E_g$ ), le nombre de porteurs intrinsèques ( $n_i$ ), la conductivité thermique ( $\lambda_{th}$ ), la permittivité diélectrique ( $\epsilon_r$ ). D'autres valeurs de paramètres sont à ce jour peu connues ou inconnues comme celles des coefficients d'ionisation des électrons et des trous ( $\alpha_n$  et  $\alpha_p$ ) nécessaires au calcul de la tension de claquage ou encore celle de la durée de vie des porteurs ( $\tau_n$  et  $\tau_p$ ) permettant de calculer le taux de recombinaison. L'évolution de l'énergie d'activation (EA) du bore en fonction de la concentration de dopant est encore mal connue. En effet, pour les fortes concentrations de dopants ( $N_a \geq 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ), l'ionisation des atomes dopants est complète [9]. Mais pour les concentrations de bore inférieures ( $N_a \leq 3.10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ), on trouve dans la littérature de multiples valeurs. Il a été démontré que l'énergie d'activation du bore était directement liée à la qualité des couches de diamant et notamment au taux de compensation dû à la présence d'azote dans ces couches [9]. Les valeurs de mobilité ( $\mu_p$  et  $\mu_n$ ) présentées dans la littérature ont la particularité d'être assez inhomogènes. En effet, ce paramètre dépend fortement des défauts présents ou non dans le matériau, il évolue donc avec la qualité des couches obtenues. Le dopage de type n étant encore très difficile, seule la valeur de la mobilité des trous ( $\mu_p$ ) est étudiée. Le graphe présenté (Fig. 7) montre les différentes valeurs de mobilité relevées

dans la littérature pour différentes valeurs de concentration de porteurs libres. On peut constater une dispersion importante des résultats et donc s'interroger sur la pertinence des valeurs mesurées. Afin d'extraire les valeurs des paramètres du modèle de mobilité (relation 3) utilisé dans le logiciel nous avons donc approximé la caractéristique  $\mu_p$  (NA) à partir des points expérimentaux. Les valeurs des paramètres obtenus sont présentées dans le tableau 1.

$$\mu = \mu_{\min 1} \cdot \exp\left(\frac{-Pc}{Ni}\right) + \frac{\mu_{\text{const}} - \mu_{\min 2}}{1 + \left(\frac{Ni}{Cr}\right)^\alpha} \quad \mu_{\text{const}} = \mu_{\max} \left(\frac{T}{300}\right)^\xi \quad (3)$$

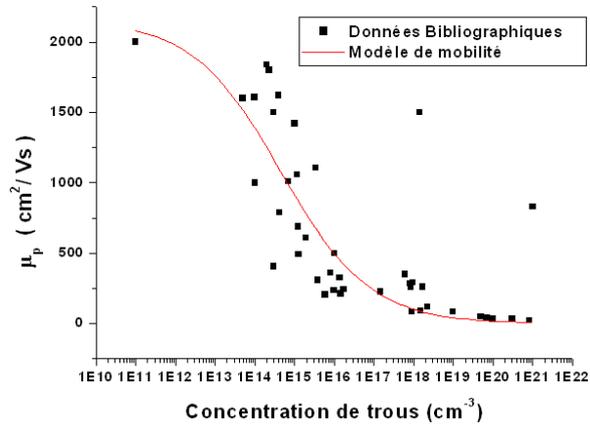


Figure 7 : Variation de la mobilité en fonction de la densité de porteurs

Tableau 1 : Paramètres du modèle de mobilité

Paramètre	Valeur
$\mu_{\max}$ (cm <sup>2</sup> /V.s)	1800
$\mu_{\min 1}$ (cm <sup>2</sup> /V.s)	0
$\mu_{\min 2}$ (cm <sup>2</sup> /V.s)	0
Pc (cm <sup>-3</sup> )	0
Cr (cm <sup>-3</sup> )	$2,78.10^{15}$
$\alpha$	0,39

Le fichier de paramètres ainsi complété, nous avons simulé la structure de test TLM utilisée pour caractériser les contacts Ti/Pt/Au, qui est une partie d'un motif TLM présenté précédemment (Fig. 3) Comme le montre la figure 8, les résultats obtenus par simulation avec les paramètres de mobilités du tableau 1, sont très différents de ceux obtenus expérimentalement. Deux paramètres peuvent être à l'origine de l'écart observé entre résultats simulés et résultats expérimentaux : la mobilité et la concentration de dopants ionisés (concentration de trous). Comme nous l'avons mentionné plus haut, la valeur de la mobilité dépend de la qualité des couches et varie donc d'un substrat à l'autre. De plus, la concentration de trous est aussi largement dépendante du procédé de fabrication des couches de diamant, qui peut induire des effets de compensation des dopants (présence d'azote par exemple). Nous avons donc fait varier ces 2 paramètres. Les résultats sont présentés sur la figure 8. En dégradant de manière

significative la mobilité (division par 10), nous obtenons des résultats plus proches des résultats expérimentaux. Mais en faisant varier de 33 % la concentration de bore de la couche p+ ( $N_a = 2.1020 \text{ cm}^{-3}$ ), nous remarquons qu'il faut seulement diviser la mobilité par 4 pour obtenir des résultats simulés en concordance avec les valeurs expérimentales. Nous pouvons donc en déduire qu'il reste encore une grande incertitude sur les valeurs des paramètres utilisés dans le simulateur notamment concernant la valeur de la mobilité des porteurs.

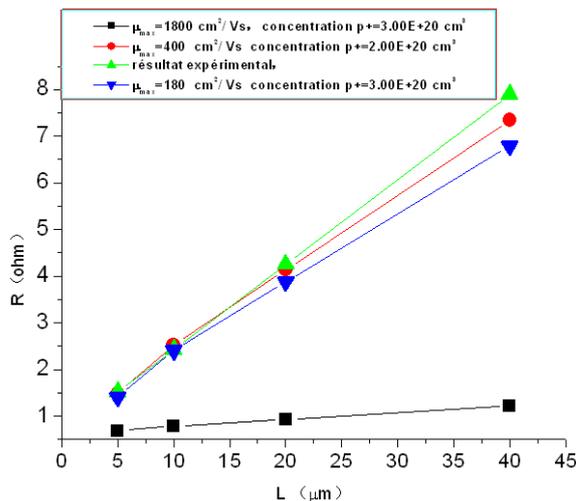


Figure 8 : Comparaison simulation expérience : évolution de la résistance en fonction de la distance inter-contacts du motif TLM.

## V. CONCLUSION

Nous avons réussi à doper des couches de diamant par implantation ionique de bore. Cependant, elles ne sont pas suffisamment dopées en surface pour déposer des contacts ohmiques. Nos essais de réalisation de contacts ohmiques donnent des résultats satisfaisants pour les deux technologies étudiées, Ti/Pt/Au et Si/Al. En outre, les bons résultats obtenus en utilisant cette dernière nous poussent à mener plus loin le développement de la technique d'implantation présentée. Les simulations présentées dans la troisième partie donnent des résultats intéressants. La dispersion dans les propriétés physiques du matériau données dans la littérature suggère que le matériau n'a pas encore atteint sa maturité.

## VI. RÉFÉRENCES

- [1] H. Schneider, J.L. Sanchez, J. Achard, "The diamond for power electronic devices", EPE'2005 - 11th European Conference on Power Electronics and Applications, Dresden, Germany, September 2005
- [2] C.E. Nebel, "Electronic properties of CVD diamond", Semicond. Sci. Technol., 2003
- [3] M. Yokoba, Y. Koide, A. Otsuki, F. Ako, T. Oku, M. Murakami, "Carrier transport mechanism of ohmic contact to p-type diamond", Semiconductor Science and Technology, Journal of Applied Physics, Volume 81, Issue 10, May 15, 1997, pp.6815-6821
- [4] R. Kalish, "Diamond as a unique high-tech electronic material: difficulties and prospects", Journal of Physics

D: Applied Physics, Volume 40, Issue 20, pp. 6467-6478 (2007)

- [5] C. Uzan Seguy, C. Cytermann, R. Brenner, V. Richter, M. Shaanan, R. Kalish, "Damage threshold for ion-beam induced graphitization of diamond", Applied Physics Letters, Volume 67, Issue 9, August 28, 1995, pp.1194-1196
- [6] N. Tsubouchi, M. Ogura, A. Chayahara, H. Okushi, "Formation of a heavily B doped diamond layer using an ion implantation technique", Diam. Rel. Mat., In Press, Corrected Proof, Available online 8 December 2007
- [7] K. Ueda, M. Kasu, "High-pressure and high-temperature annealing effects of boron-implanted diamond", Diam. Rel. Mat., In Press, Corrected Proof, Available online 2 February 2008
- [8] G.K. Reeves, H.B. Harrison, "Obtaining the specific contact resistance from transmission line model measurements", IEEE Electron Dev Lett, 1982, volume 3, issue 5, pp. 111-113
- [9] J.P. Lagrange, A. Deneuville, E. Gheeraert, "Activation energy in low compensated homoepitaxial boron-doped diamond films", Diamond and Related Materials, 1998, volume 7, pp. 1390-1393