



HAL
open science

Développement de briques technologiques pour la réalisation de composants de puissance sur diamant

Lya Fontaine, Karine Isoird, Josiane Tasselli, Alain Cazarré, Patrick Austin, Adrian Laborde

► To cite this version:

Lya Fontaine, Karine Isoird, Josiane Tasselli, Alain Cazarré, Patrick Austin, et al.. Développement de briques technologiques pour la réalisation de composants de puissance sur diamant. Conférence des Jeunes Chercheurs en Génie Electrique (JCGE 2019), Jun 2019, Oléron, France. <hal-02324807>

HAL Id: hal-02324807

<https://hal.science/hal-02324807v1>

Submitted on 22 Oct 2019

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.



HAL Authorization

Développement de briques technologiques pour la réalisation de composants de puissance sur diamant

Lya FONTAINE, Karine ISOIRD, Josiane TASSELLI, Alain CAZARRE, Patrick AUSTIN, Adrian LABORDE

LAAS-CNRS

7 Avenue du Colonel Roche 31400 Toulouse, France

lya.fontaine@laas.fr

RESUME – La fabrication de composants de puissance sur diamant repose sur la levée des différents verrous technologiques qui subsistent. L'amélioration des techniques de lithographie ainsi que le développement de motifs de tests (TLM droits et circulaires) présentés dans ces travaux vont permettre l'étude des contacts ohmiques sur différents substrats de diamant et la fabrication de composants de puissance : les jonctions P⁺N. Les motifs de tests développés ont pu être fabriqués pour la première fois sur le même échantillon que les composants, permettant une meilleure compréhension de leur réponse électrique. Les contacts sur type n n'étant pas ohmiques, les jonctions P⁺N ne présentent pas les performances attendues. Les contacts de type p sont quant à eux ohmiques malgré leur fabrication sur une zone gravée par plasma et donc endommagée. La résistance spécifique de contact mesurée est dans les normes de la littérature pour les niveaux de dopage étudiés ($\rho_{C1} = 3,6 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ pour un dopage de $7,5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ et $\rho_{C2} = 4,4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ un dopage de $3,1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$).

ABSTRACT – The microfabrication of power devices on diamond is based on the removal of various technological locks that remain. The improvement of lithography techniques as well as the development of test patterns (linear and circular TLM) presented in this work will allow the study of ohmic contacts on different diamond substrates and the manufacture of power devices such as P⁺N junctions. The test patterns developed could be manufactured for the first time on the same sample as the devices, allowing a better understanding of their electrical response. Since n-type contacts are not ohmic, the P⁺N junctions do not have the expected behavior. While p-type contacts were fabricated on an etched area and therefore a damaged surface, the results show an ohmic behavior, and the measured specific contact resistance is within literature range.

MOTS-CLES – Composants de puissance, Diamant, Contacts ohmiques, Jonction P⁺N

1. Introduction

La majorité des composants de puissance actuels sont encore à ce jour des composants réalisés à base de silicium. Cependant, les exigences de l'électronique de puissance en termes de fortes tensions, de fortes densités de puissance, de température et de fréquences plus élevées sont de plus en plus sévères. Ainsi, les propriétés physiques d'autres matériaux tels que les semi-conducteurs à large bande interdite permettent d'envisager le remplacement du silicium pour la conception et la fabrication de composants de puissance de plus en plus performants. C'est le cas du nitrure de gallium, du carbure de silicium ainsi que du diamant. Ces travaux se concentrent sur l'étude de l'utilisation de substrats de diamant.

Le diamant est un semi-conducteur à large bande interdite ($E_g = 5,5 \text{ eV}$) particulièrement indiqué pour les applications de forte puissance. Il possède de fortes mobilités de porteurs ($2200 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ pour les électrons et $2050 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ pour les trous [1]), permettant le passage de fortes densités de courant, un champ de rupture élevé ($E_c \sim 10 \text{ MV/cm}$ [2]) et une forte conductivité thermique ($\lambda \sim 20 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) facilitant la dissipation thermique.

Cependant, malgré ces propriétés prometteuses, de nombreux verrous technologiques compliquent ou empêchent la fabrication de composants de puissance sur diamant. Si la fabrication de contacts ohmiques sur diamant de type p est maîtrisée [3][4], la résistance spécifique de contact doit encore être améliorée pour atteindre les performances souhaitées. De plus, d'après la littérature aucun contact réalisé sur diamant de type n n'a montré de caractère ohmique [5][6][7], ce qui reste un frein majeur à l'avancement de la technologie sur diamant.

Afin de lever ces verrous, plusieurs étapes technologiques ont été optimisées dans nos travaux afin de pallier les problèmes causés par la petite taille des échantillons ($2 \times 2 \text{ mm}^2$ à $3 \times 3 \text{ mm}^2$). Des structures de tests appelées TLM (pour *Transmission Line Method*) et cTLM (*Circular Transmission Line Method*) ont également été développées et testées, et des jonctions P⁺N ont été fabriquées.

2. Optimisation des techniques de lithographie

Un des freins au développement des composants à base de diamant est la taille des échantillons qui reste à ce jour inférieure à $7 \times 7 \text{ mm}^2$. De nombreuses recherches sont engagées à travers le monde pour accroître la taille des échantillons mais à ce jour nous devons nous contenter d'échantillons de $2 \times 2 \text{ mm}^2$ et $3 \times 3 \text{ mm}^2$ pour développer et optimiser les différentes étapes technologiques nécessaires à la réalisation de composants de puissance. Les techniques de lithographie classiques utilisées pour la fabrication de composants microélectroniques doivent donc être adaptées aux petites dimensions des échantillons diamant.

2.1 Le dépôt de la résine photosensible

Le dépôt de résine photosensible sur l'échantillon doit être homogène pour permettre d'obtenir une bonne définition des motifs souhaités afin de réaliser les composants ou les motifs de tests. La technique privilégiée est habituellement celle du dépôt à la tournette ou *Spin-Coating*. Cette technique s'avère inutilisable sur un échantillon de diamant carré de petite taille, puisqu'on observe sur sa périphérie la formation d'un bourrelet de résine d'épaisseur variable pouvant aller jusqu'à $10 \mu\text{m}$ d'épaisseur et qui recouvre une grande partie de la surface, réduisant la surface utile à 50% (Figure 1-a).

Afin d'optimiser ce dépôt nous avons envisagé l'utilisation d'un dépôt par spray ou *Spray-Coating*, une technique permettant de pulvériser des microgouttelettes de résine photosensible sur toute la surface de l'échantillon [8]. La Figure 1-b montre l'amélioration obtenue en réduisant significativement des effets de bord.

Développé pour des résines dites positives, le *Spray-Coater* a été adapté pour permettre l'utilisation de résines photosensibles négatives à flancs inversés nécessaires pour la réalisation de contacts métalliques par la technique de *lift-off*. La résine NLOF a dû être fluidifiée par dilution dans l'acétone pour permettre son utilisation avec le *Spray-Coater*. Afin d'obtenir un dépôt homogène avec une épaisseur contrôlée de $5 \mu\text{m}$, les paramètres du *Spray-Coater* ont été optimisés. Le nombre de passage de la buse a été fixé à 4, le débit de pulvérisation de la résine modifiée à 1 mL/min et la température du substrat réglée à 70°C .

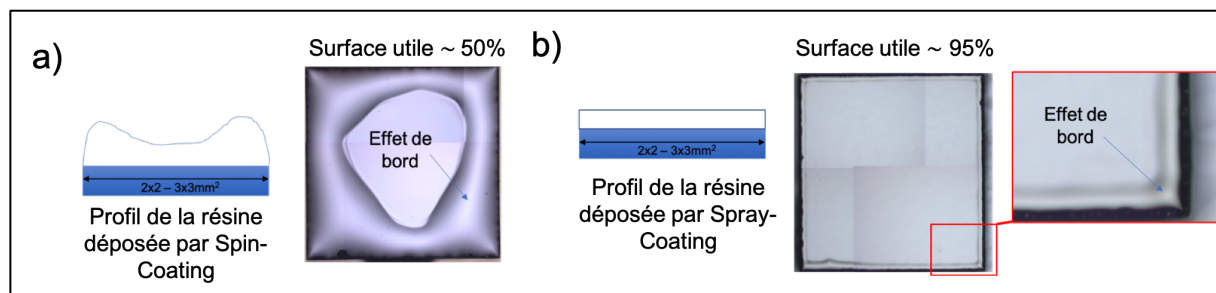


Figure 1 : Profil schématique de la résine photosensible NLOF et vue de dessus d'un échantillon après dépôt par a) Spin-Coating, b) Spray-Coating

2.2 Insolation de la résine photosensible

L'étalement de la résine par *Spray-Coating* permet d'obtenir un dépôt homogène à épaisseur contrôlée. L'étape suivante consiste en l'optimisation des conditions d'insolation de la résine afin d'atteindre la résolution souhaitée.

En effet, pour des échantillons diamant de petite taille, les techniques classiques de lithographie UV avec les machines d'insolation manuelles ou semi-automatique ne sont pas adaptées. Le masque étant beaucoup plus grand que l'échantillon le contact entre les deux n'est pas optimum ce qui limite la résolution de cette technique. Avec ce procédé il est impossible de réaliser de motifs de largeur minimale d'un micron comme on peut l'observer sur la Figure 2.

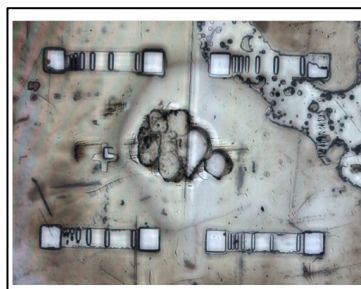


Figure 2 : Motif dans de la résine photosensible négative obtenus par insolation classique

La lithographie laser développée au laboratoire a donc été adaptée à nos besoins. Cette technique permet d'insoler localement la résine sur l'échantillon à l'aide d'un faisceau laser sans passer par un masque physique. Elle permet également une meilleure souplesse dans la définition des motifs souhaités (voir Figure 3-a).

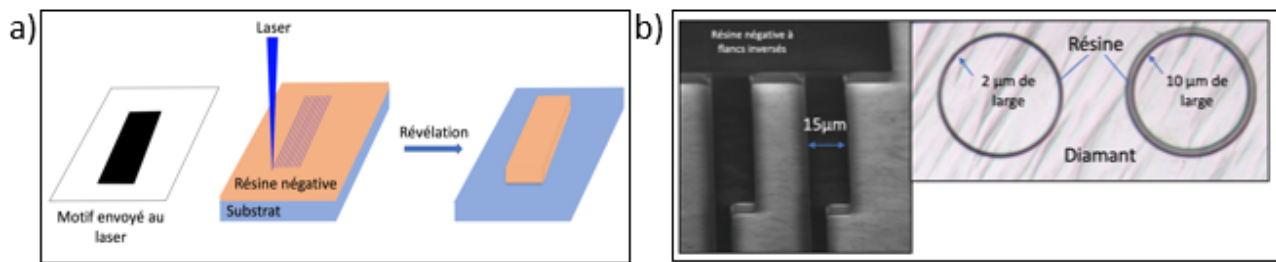


Figure 3 : a) Principe de l'insolation laser (exemple avec une résine négative). b) Motifs dans la résine photosensible négative obtenus par insolation laser, observation des flancs inversés dans la résine

Les différents paramètres de la machine (puissance laser, vitesse d'écriture et présence ou non d'un filtre) ont été optimisés pour chaque écriture, ce qui permet d'obtenir les motifs souhaités en fonction de l'épaisseur et du type de résine et de la résolution minimale voulue. Différents jeux de paramètres peuvent donc être utilisés sur un même échantillon.

Pour un échantillon de $3 \times 3 \text{ mm}^2$, l'insolation peut prendre plusieurs heures en fonction de la résolution finale attendue et de la taille des motifs, ce qui constitue l'inconvénient majeur de cette technique. Il est donc nécessaire de faire un compromis entre temps d'insolation et définition des motifs. Si l'on veut une grande précision d'écriture, il est nécessaire de réduire la vitesse d'écriture (qui varie généralement entre $0,1$ et $3 \mu\text{m}/\text{seconde}$) et donc de réduire également la puissance du laser (ou de rajouter un filtre pour garder la même dose d'insolation), ce qui rallongera considérablement le temps d'insolation. A titre d'exemple, le balayage complet d'un échantillon de $3 \times 3 \text{ mm}^2$ à une vitesse de $2 \mu\text{m}/\text{seconde}$ dure environ 6h mais permet d'obtenir une cinquantaine de motifs de résolution de l'ordre de quelques microns, comme le montre la Figure 3-b, où l'on peut voir des couronnes de résine NLOF de $2 \mu\text{m}$ et $10 \mu\text{m}$ de large.

3. Réalisation de contacts ohmiques

L'optimisation de la lithographie sur substrat diamant de petite dimension a été mise à profit dans un premier temps pour la réalisation de motifs de tests TLM (Transmission Line Measurement) nécessaires à l'étude des contacts ohmiques. Cette technique consiste à fabriquer sur un substrat plusieurs contacts métal/semiconducteur séparés par une distance connue. Des mesures courant-tension entre les différents contacts permettent alors de déterminer la résistance spécifique de contact ρ_c entre ce métal et le semiconducteur étudié [9]. Plus celle-ci est faible, meilleur est le contact.

La fabrication de contacts ohmiques de bonne qualité sur les substrats de diamant reste un des verrous principaux à lever. Aucun contact ohmique sur diamant de type n'a été démontré à l'heure actuelle ce qui rend difficile la fabrication de composants bipolaires comme les jonctions PN. Le problème est dû en partie à la difficulté d'obtenir de forts dopages (au-dessus de $10^{17} \text{ at.cm}^{-3}$) sur ce type de couche, à cause de la faible solubilité limite du phosphore dans le diamant ($10^{19} \text{ at.cm}^{-3}$). Il est également nécessaire d'optimiser les contacts ohmiques sur le diamant de type p pour espérer atteindre une meilleure résistance spécifique de contact (inférieure à $10^{-4} / 10^{-5} \Omega.\text{cm}^2$) pour les composants de puissance qui seront réalisés.

3.1 Réalisation des contacts

Plusieurs échantillons ont été fabriqués au GEMaC (pour le diamant de type n) et au LSPM (pour le diamant de type p) afin de caractériser les contacts métalliques à partir d'éléments de test TLM droit et circulaire (cTLM) qui seront réalisés simultanément sur un même substrat afin de comparer les deux méthodes [7][10], comme on peut le voir sur la figure 4.

Le procédé technologique développé est décrit sur la figure 4.a : il commence par le dépôt d'une couche de SiO_2 de 200nm par PECVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*), nécessaire pour isoler électriquement les plots métalliques de contact des TLM droits de la couche de diamant.

Une première lithographie laser réalisée avec une résine positive AZ4999 permet de définir les zones où seront situés les TLM circulaires et les barres de TLM droits. On grave ensuite le SiO_2 par gravure plasma par RIE (*Reactive Ion Etching*) à partir d'un mélange $\text{CHF}_3 / \text{O}_2$ ($50\text{sccm}/3\text{sccm}$), à 100W et 70mT pendant 11 minutes.

Une seconde lithographie est ensuite réalisée avec une résine négative à flancs inversés (NLOF) pour définir les contacts métalliques, à savoir les barres de TLM droits et les couronnes de cTLM. Cette étape est critique et nécessite un alignement fiable à $1 \mu\text{m}$ près, pour aligner les barres métalliques sur les ouvertures dans le SiO_2 , et une résolution minimale de $2 \mu\text{m}$ qui correspond à la largeur de la couronne de cTLM de plus petite dimension. Le développement des techniques de microfabrication précédemment présentées a rendu cette étape possible. On observe sur la Figure -b. un motif de TLM droit obtenu à cette étape grâce à des conditions d'alignement et d'insolation optimales.

L'empilement de métaux $\text{Ti}(50\text{nm})/\text{Pt}(50\text{nm})/\text{Au}(500\text{nm})$ est déposé par évaporation thermique et la résine est ensuite enlevée (technique du *lift-off*). La dernière étape concerne le recuit thermique des contacts à 500°C pendant 1h sous N_2 .

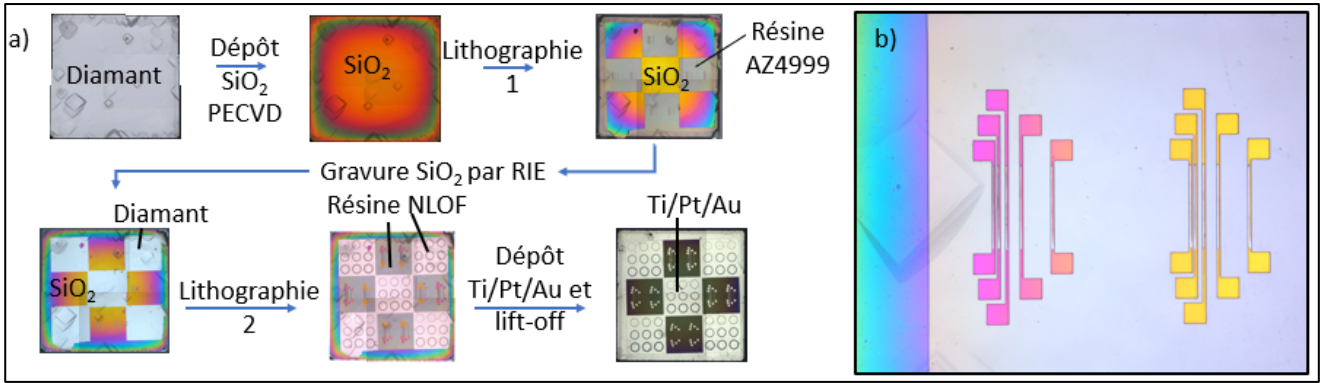


Figure 4 : a) Photos des différentes étapes du procédé de fabrication des motifs de TLM droits et circulaires sur un même échantillon b) Motifs de TLM droits après ouverture dans le SiO₂ et définition des motifs de plots dans la résine négative par lithographie laser

3.2 Caractérisation électrique des motifs TLM

Les motifs TLM droits du premier échantillon de type p dopé au bore à $1 \times 10^{20} \text{ at/cm}^3$ ont été caractérisés. Ces premiers résultats électriques sont présentés Figure . Les courbes courant-tension mesurées à température ambiante sont linéaires (Figure -a) montrant le comportement ohmique des contacts. La résistance totale mesurée entre deux contacts voisins est alors tracée en fonction de la distance les séparant et ce à différentes températures (Figure -b).

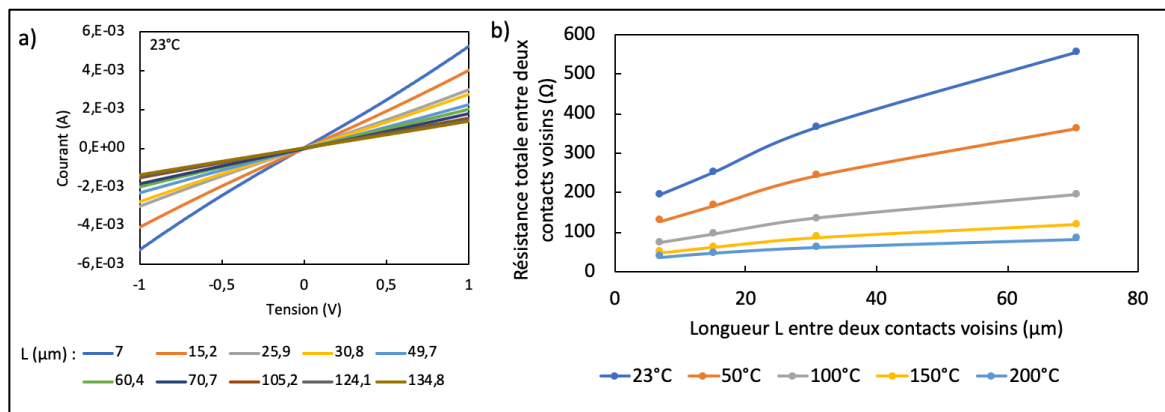


Figure 5 : a) Caractéristiques courant-tension pour différentes longueur L entre deux contacts voisins à température ambiante. b) Résistance totale entre deux contacts voisins en fonction de la distance entre ces contacts à différentes températures.

Il est alors possible de calculer la résistance spécifique du contact à partir de l'équation :

$$\rho_c = \frac{L \cdot W \cdot \sqrt{R_c^2 - R_E^2}}{\text{argch}\left(\frac{R_c}{R_E}\right)} \quad (1)$$

où L et W sont respectivement la largeur et la longueur mesurées des barres du motif TLM, R_c est la résistance de contact que l'on déduit des courbes de la Figure -b (R_c correspond à la moitié de l'ordonnée à l'origine de la droite obtenue), et R_E est la résistance de fin de contact définie comme :

$$R_E = \frac{R_{12} + R_{23} - R_{13}}{2} \quad (2)$$

et calculée à partir des résistances mesurées sur trois contacts tel que représenté sur la figure 6:

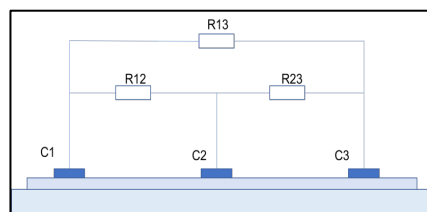


Figure 6 : Schéma du principe de la mesure de la résistance de fin de contact R_E

On peut enfin calculer R_{SK} , la résistance par carré de la couche modifiée sous le contact :

$$R_{SK} = (R_C \cdot L \cdot W) \operatorname{argch} \left(\frac{R_C}{R_E} \right) \quad (3)$$

On calcule donc pour cet échantillon, $\rho_C = 4,8 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ et $R_{SK} = 6,1 \times 10^{-4} \Omega/\blacksquare$ à température ambiante et $\rho_C = 1,1 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ et $R_{SK} = 9,7 \times 10^{-5} \Omega/\blacksquare$ à 200°C. L'amélioration de la résistance spécifique de contact quand la température augmente peut être expliquée par le phénomène d'ionisation incomplète. En effet, dans le diamant à température ambiante, tous les dopants ne sont pas activés (à cause de l'énergie d'activation du bore $E_a=0,18\text{eV}$ pour un échantillon dopé à $1 \times 10^{20} \text{at/cm}^3$). L'augmentation de la température va activer les dopants. Au contraire, à ce niveau de dopage, la mobilité des porteurs est déjà très faible ($\mu_p=30 \text{cm}^2/\text{V.s}$ [11]) et ne varie quasiment plus avec la température. Les motifs de cTLM ont aussi été caractérisés mais aucune valeur cohérente de résistance spécifique de contact n'a pu être calculée puisque la courbe R_T en fonction de d n'est pas linéaire. Un nouveau protocole de mesure est en cours d'élaboration. Ces résultats sont tout de même encourageants et devront être comparés à ceux obtenus avec les échantillons de type n et de type p avec des dopages différents, actuellement en cours de test.

4. Fabrication de jonctions P⁺N

Les briques technologiques pour la microfabrication de composants de puissance sur diamant étant optimisées, nous avons défini un procédé de fabrication de jonctions P⁺N.

4.1 Procédé de fabrication

Les empilements de couches p et n sont réalisées au GEMaC et au LSPM par *Microwave plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition* (MPCVD) sur deux substrats de diamant lb d'orientation cristalline (111) pour l'échantillon 1 et (100) pour l'échantillon 2, et de dimensions surfaciées $2 \times 2 \text{mm}^2$ et $3 \times 3 \text{mm}^2$ respectivement.

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**-a. présente une vue en coupe schématique des jonctions P⁺N. Dans le cas de l'échantillon 1, les couches P⁺ et N ont respectivement des concentrations de bore $[B_1]=7,5 \times 10^{19} \text{at/cm}^3$ et de phosphore $[P_1]=7,5 \times 10^{17} \text{at/cm}^3$. Dans le cas de l'échantillon 2 d'orientation (100) les concentrations de bore et de phosphore sont respectivement $[B_2]=3,1 \times 10^{19} \text{at/cm}^3$ et $[P_2]=5,0 \times 10^{16} \text{at/cm}^3$.

On peut observer l'échantillon 1 après fabrication sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**-c. La zone N est tout d'abord définie par gravure RIE (gravure sèche par une succession d'étapes de plasma Ar/O₂ (8 sccm/40 sccm) et CF₄/O₂ (4sccm/40sccm) ([12]), afin d'atteindre la zone P⁺. Un seul dépôt de Ti(50nm) / Pt(50nm) / Au(500nm) est ensuite effectué sur les deux zones pour former les contacts ohmiques [13], suivi par un recuit thermique à 500°C pendant 1h.

Des motifs de tests cTLM sont mis en œuvre dans ce cas pour caractériser les contacts ohmiques de type p et n (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**-b.). Les couronnes ont des dimensions d variant de $2 \mu\text{m}$ à $20 \mu\text{m}$. C'est la première fois au laboratoire que les motifs de tests peuvent être réalisés sur le même échantillon que les composants de puissance sur diamant. La trop petite taille des échantillons et la complexité de réalisation des motifs de tests, comme les TLM droits précédemment utilisés, ne permettaient pas une fabrication simultanée.

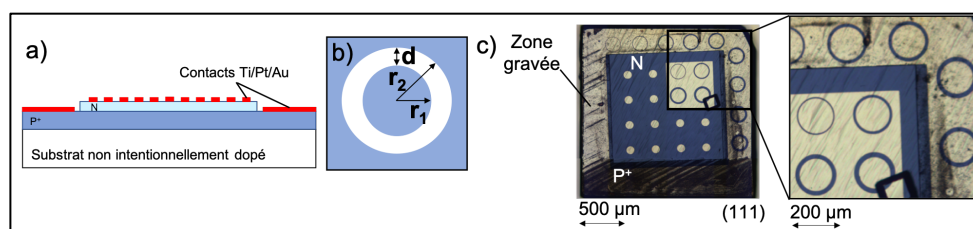


Figure 7 : a) Vue en coupe schématique des jonctions P⁺N b) Schéma d'une couronne de cTLM c) Photo de l'échantillon 1 après fabrication

4.2 Caractérisation I(V)

Des mesures courant-tension (I/V) ont été réalisées sur les différents motifs à l'aide d'une source HP4142 et d'un testeur sous pointes. Le comportement des contacts cTLM de type n sont présentés sur la Figure 8-a : il s'agit de contacts de type Schottky et non ohmiques. Par conséquent, la réponse des jonctions P⁺N est masquée par celle de ces contacts, et on n'observe pas le comportement électrique attendu pour une caractéristique I(V) de diode comme on peut le voir sur la Figure 8-b.

Les cTLM de type p présentent bien quant à eux une courbe I/V linéaire, caractéristique d'un contact ohmique. La résistance totale de chaque couronne est tracée en fonction de la largeur d de celle-ci (voir Figure 8-c et d). La résistance

de couche R_S et la longueur de transfert L_T sont estimées à partir des valeurs expérimentales et la résistance spécifique de contact est calculée pour les deux échantillons à partir de l'équation 4 [5].

$$\rho_C = R_S L_T^2 \quad (4)$$

On obtient $\rho_{C1} = 3,6 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ pour l'échantillon 1 et $\rho_{C2} = 4,4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ pour l'échantillon 2. Ces contacts ont été fabriqués sur une zone gravée par RIE, et donc une surface endommagée. Malgré cela, les valeurs des résistances spécifiques de contact obtenues sont cohérentes avec celles de la littérature pour les niveaux de dopage étudiés, à savoir $7,5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ et $3,1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ respectivement. Cela montre que la gravure RIE qui permet d'atteindre la couche p n'a pas d'influence sur la fabrication des contacts ohmiques et donc sur les résultats électriques.

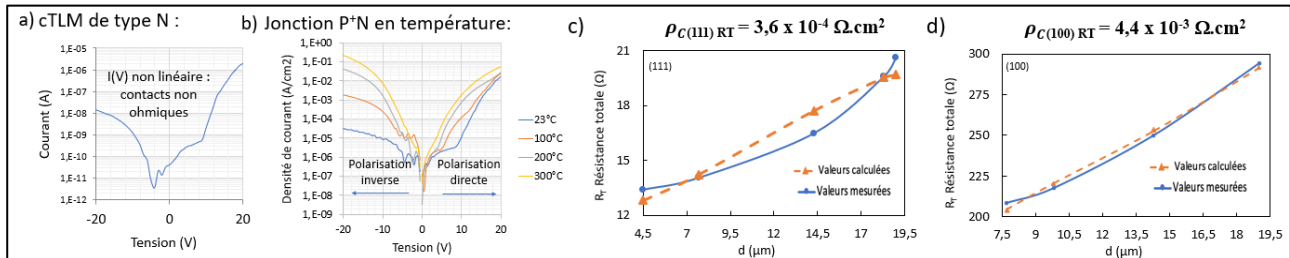


Figure 8 : Caractérisation sous pointes I(V) a) des motifs cTLM sur type n, b) des jonctions P⁺N et résistance totale des couronnes en fonction de leur largeur d pour c) l'échantillon 1, d) l'échantillon 2

5. CONCLUSION

Les verrous technologiques limitant le développement de composants de puissance sur substrat de diamant ont été étudiés. Les techniques de lithographie sur petits échantillons ont été optimisées au LAAS. L'utilisation du *spray-coating* de résine et de la lithographie laser a permis l'augmentation significative de la surface utilisable de chaque échantillon et l'amélioration de la définition des motifs. Une résolution minimale d'un micron a été obtenue, contre plusieurs microns précédemment. Des motifs de test de TLM et cTLM ont ainsi pu être développés et testés sur des couches diamant de type p.

Le développement des motifs de cTLM a notamment permis leur inclusion au plus près des composants de puissance. Un exemple de cette association a été présenté avec l'étude de jonctions P⁺N. Le comportement Schottky des contacts de type n a altéré les performances des diodes P⁺N. Les contacts sur diamant de type p sont quant à eux ohmiques, et leur résistance spécifique de contact a été évaluée à $\rho_{C1} = 3,6 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ pour un dopage Bore de $7,5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ et $\rho_{C2} = 4,4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ pour un dopage de $3,1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$.

Remerciements

Ce travail est supporté par l'Agence Nationale de la Recherche ANR dans le cadre du projet MOVeToDIAM N° : ANR-17-CE05-0019-02 et par la plateforme micro-nanotechnologies du LAAS-CNRS, membre du réseau Renatech.

Les auteurs souhaitent remercier Marie-Amandine Pinault Thauray, Julien Barjon et Riadh Issaoui pour la fourniture des échantillons diamant, et Nicolas Mauran pour son aide au niveau de la plateforme de caractérisation du LAAS-CNRS.

Références

- [1] S. Koné et al., « CVD diamond Schottky barrier diode, carrying out and characterization », *Diamond and Related Materials*, vol. 19, n° 7-9, p. 792-795, July 2010.
- [2] S. Koné, « Développement de briques technologiques pour la réalisation des composants de puissance en diamant monocristallin, » Université Paul Sabatier, Toulouse, 2011.
- [3] J. Nakanishi, A. Otsuki, T. Oku, O. Ishiwata, and M. Murakami, « Formation of ohmic contacts to p -type diamond using carbide forming metals, » *Journal of Applied Physics*, vol. 76, no. 4, pp. 2293–2298, Aug. 1994.
- [4] G. Civrac, « Vers la réalisation de composants haute tension, forte puissance sur diamant CVD. Développement des technologies associées, » INP Toulouse, Toulouse, 2009.
- [5] H. Kato, D. Takeuchi, N. Tokuda, H. Umezawa, H. Okushi, et S. Yamasaki, « Characterization of specific contact resistance on heavily phosphorus-doped diamond films », *Diamond and Related Materials*, vol. 18, n° 5–8, p. 782-785, mai 2009.
- [6] T. Teraji, S. Koizumi, S. Mita, A. Sawabe, et H. Kanda, « Electrical Contacts for n-Type Diamond », *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 38, n° 10A, p. L1096, oct. 1999.
- [7] H. Kato, H. Umezawa, N. Tokuda, D. Takeuchi, H. Okushi, et S. Yamasaki, « Low specific contact resistance of heavily phosphorus-doped diamond film », *Applied Physics Letters*, vol. 93, n° 20, p. 202103, nov. 2008.
- [8] N.P. Pham et al., « Spray coating of photoresist for pattern transfer on high topography surfaces », *Journal of Microelectronics and Microengineering*, vol. 15, No. 4, pp. 691-697, April 2005.

- [9] H. Berger, “Models for contacts to planar devices,” *Solid-State Electronics*, vol. 15, pp. 145–158, Feb. 1972.
- [10] Y.G Chen *et al.*, « Investigation of specific contact resistance of ohmic contacts to B-doped homoepitaxial diamond using transmission line model », *Diamond and Related Materials*, vol. 13, no 11–12, pp 2121-2124, 2004.
- [11] A. Maréchal, « Metal-oxide-semiconductor capacitor for diamond transistor: simulation, fabrication and electrical analysis », Grenoble, 2015.
- [12] F. Thion, “Conception de protections périphériques applicables aux diodes Schottky réalisées sur diamant monocristallin.,” 2010.
- [13] P. Muret *et al.*, “Carbide contacts on homoepitaxial diamond films,” *Diamond and related materials*, vol. 8, no. 2–5, pp. 961–965, 1999.