



HAL
open science

Le Diamant pour l'Electronique de Puissance - Développement des Technologies Associées

Gabriel Civrac, Henri Schneider, Marie-Laure Locatelli, Karine Isoird, Hui
Ding

► **To cite this version:**

Gabriel Civrac, Henri Schneider, Marie-Laure Locatelli, Karine Isoird, Hui Ding. Le Diamant pour l'Electronique de Puissance - Développement des Technologies Associées. MGE 2008 4ème Colloque Matériaux du Génie Electrique, May 2008, TOULOUSE, France. 4 p. hal-01002185

HAL Id: hal-01002185

<https://hal.science/hal-01002185v1>

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.

Le Diamant pour l'Electronique de Puissance – Développement des Technologies Associées

G. Civrac¹, H. Schneider¹, M.L. Locatelli¹, K. Isoird², H. Ding²

¹ Université de Toulouse

LAPLACE - CNRS – UPS – INPT

2, rue C. Camichel 31071 Toulouse France

² LAAS – CNRS

7, Av. Colonel Roche 31077 Toulouse

E-Mail: henri.schneider@laplace.univ-tlse.fr

Abstract : Nous présentons ici nos travaux concernant l'utilisation du diamant en électronique de puissance. Deux aspects distincts sont abordés. Dans un premier temps, nous envisageons le diamant comme substrat pour la réalisation de composants électroniques. Ensuite, nous faisons état de nos études sur son utilisation pour le management thermique.

INTRODUCTION

Les contraintes d'utilisation, de plus en plus sévères (haute tension, haute température, fréquence élevée) en électronique de puissance, ont conduit la communauté à se pencher sur l'exploitation de nouveaux matériaux, tels que le SiC, le GaN et plus récemment le diamant. Ces matériaux grands gaps permettraient de repousser les limites actuelles des composants en silicium. 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)[1] permet une bonne évacuation de la chaleur. Enfin, il possède de très bonnes mobilités des porteurs électriques (4500 cm²/Vs pour les électrons et 3800 cm²/Vs pour les trous)[2]. Ces propriétés en font un candidat idéal pour l'électronique de puissance.

Tout d'abord, nous présenterons un rapide état des lieux des substrats de diamant CVD disponibles à l'heure actuelle.

Puis, nous présenterons nos études sur l'utilisation du diamant comme substrat pour la conception et la réalisation de composants actifs. Nous détaillerons nos travaux concernant les étapes technologiques à mettre en œuvre pour y parvenir et la mise en place d'une plate-forme de simulation.

Le diamant présente également des propriétés physico-chimiques exceptionnelles particulièrement adaptées à la gestion thermique des composants semi-conducteurs de l'électronique de puissance. La troisième partie traitera de l'exploitation de ces propriétés dans le packaging des composants de puissance.

LE DIAMANT CVD

Les diamants utilisables en électronique de puissance

sont des couches déposées par MWCVD. Cette technique garantit une haute pureté du matériau, condition nécessaire à une utilisation en électronique.

Le substrat sur lequel on fait croître la couche de diamant joue un rôle très important dans la qualité du film obtenu. Les films de diamant monocristallins sont obtenus par homo épitaxie (dépôt sur un substrat de diamant naturel ou HPHT), tandis qu'une croissance par hétéroépitaxie donne lieu à la croissance d'un diamant de type polycristallin.

A l'heure actuelle, on sait fabriquer des diamants monocristallins de très bonne qualité, ayant des surfaces de l'ordre de 5x5 mm² et des épaisseurs allant jusqu'à plus d'1 mm. Nous utilisons ce type de diamant pour la réalisation de composants actifs.

Quant au diamant polycristallin, on peut fabriquer des wafers de l'ordre de 2 à 4 pouces, ayant des tailles de grain variant selon les conditions de croissance. Le prix du diamant polycristallin est très inférieur à celui du monocristallin. Nous étudions la possibilité d'utiliser ce type de diamant pour le management thermique.

COMPOSANTS ACTIFS

Notre objectif est la conception et la réalisation des premiers dispositifs à base de diamant CVD : une diode Schottky, un interrupteur à commande électronique et une diode PIN. Pour cela, nous avons besoin de développer des briques technologiques de base comme l'implantation ou la réalisation de contacts ou encore la gravure. Parallèlement, il est nécessaire de développer une base de simulation permettant de modéliser le comportement de dispositifs à base de diamant.

Le dopage par implantation ionique de Bore

A ce jour, le dopage reste un verrou technologique majeur. 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).

Dans le cas du dopage p, le principal dopant utilisé est le bore, qui a un niveau d'ionisation relativement élevé (0,37 eV). Le dopage in-situ (lors de la croissance des couches) fonctionne bien, sur de larges plages de dopage. Le dopage par diffusion paraît impossible, les coefficients de diffusion des impuretés dans le diamant étant très faibles et les températures nécessaires trop élevées.

Nous nous intéressons au dopage par implantation ionique de Bore. Cette technologie permet une grande précision ainsi qu'une grande souplesse en ce qui concerne les concentrations et les géométries des zones dopées, conditions nécessaires pour la réalisation 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 $D_c = 1.10^{22} \text{ cm}^{-3}$ [3]. De nombreuses études sont donc menées pour minimiser la concentration de défauts créés dans le cristal [4] ou pour trouver des conditions de recuit favorisant la recristallisation du diamant [5]. Le recuit post-implantation lui-même n'est pas aisé. En effet, à haute température, le diamant réagit avec l'oxygène pour former du 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. La Fig. 1 présente la simulation SRIM du profil d'implantation de Bore dans l'échantillon, ainsi que le taux de dommages créés, pour une implantation de 60 keV et une dose de $5.10^{14} \text{ cm}^{-2}$.

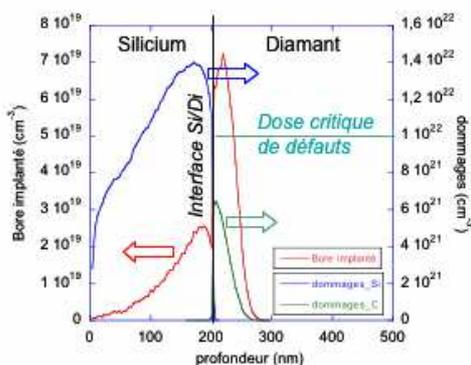


figure 1 : simulation SRIM du profil de Bore implanté dans l'échantillon de diamant encapsulé dans du silicium et profil des défauts implantés.

L'implantation a été réalisée. Nous avons mesuré l'influence de la température sur la conductivité de l'échantillon (Fig. 2), prouvant que la couche de diamant a effectivement été dopée. Des caractérisations physiques (SIMS, cathodoluminescence, effet Hall), sont en cours pour déterminer les paramètres importants résultants de cette implantation (mobilité, taux de Bore

en substitution, densité de défauts, ...).

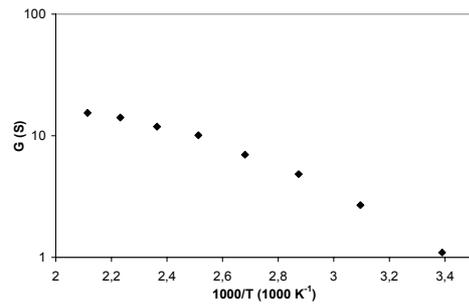


figure 2 : influence de la température sur la conductivité de l'échantillon

Les contacts ohmiques

Tout dispositif de puissance nécessite la réalisation de contacts, ohmiques [6,7] ou Schottky [7]. La mise au point de cette étape est donc une priorité, le but étant de trouver les matériaux adéquats et les conditions de dépôt et de recuit optimum. Pour l'heure, nous nous penchons sur le dépôt de contacts ohmiques de types Ti/Pt/Au et Si/Al. Le titane et le silicium ont la propriété de réagir avec le diamant lors du recuit pour créer un carbure à l'interface contact/diamant qui promeut l'adhérence et favorise l'ohmicité du contact. Le platine sert de barrière de diffusion de la couche d'or.

La Fig. 3 présente les motifs de test TLM que nous avons réalisés pour caractériser les contacts déposés. Ces motifs présentent des distances inter-contacts $L_1 = 5 \mu\text{m}$, $L_2 = 10 \mu\text{m}$, $L_3 = 20 \mu\text{m}$ et $L_4 = 40 \mu\text{m}$, pour une largeur de contact $W = 400 \mu\text{m}$. Le fait d'avoir un grand rapport largeur de contact sur longueurs inter-contacts permet de s'affranchir de la traditionnelle gravure MESA, généralement utilisée pour délimiter la zone de test de manière à éviter l'effet parasite généré par des courants de frange. La largeur de contact L_c vaut $10 \mu\text{m}$. Les dimensions du contact sont fixées par des gravures ioniques effectuées dans une couche de passivation (ici, du SiO_2). Ceci permet de déposer des métallisations ayant des dimensions supérieures, ce qui facilite ensuite l'étape de test sous pointes.

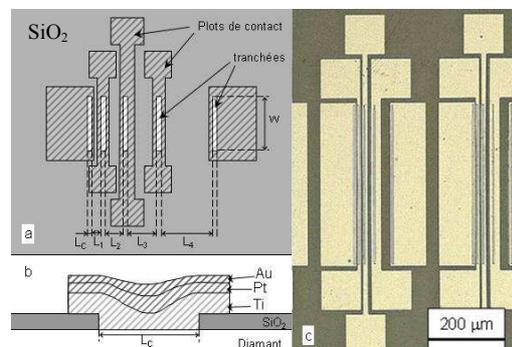


figure 3 : a) schéma du motif de test TLM utilisé. b) coupe schématique des contacts. c) photographie des structures réalisées

Les contacts présentés ont été déposés sur une couche

de diamant fortement dopée p ($3 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) de $1,5 \mu\text{m}$ d'épaisseur. Nous avons utilisé une métallisation Ti/Pt/Au ($50 \text{ nm}/50 \text{ nm}/200 \text{ nm}$). La résistance caractéristique de contact extraite des mesures est d'environ $1 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ pour une résistance par carré de la couche de $75 \Omega/\square$. La faible résistance spécifique de contact obtenue est compatible avec la réalisation de composants destinés à une utilisation en électronique de puissance. Des tests similaires ont été réalisés pour la technologie Si/Al et donnent des résultats analogues.

La gravure

Le diamant est chimiquement inerte jusqu'à plusieurs centaines de °C. On ne sait pas le graver par voie humide. Les procédés utilisés font donc appel à des gravures ioniques fortement énergétiques, faisant intervenir de l'oxygène parfois lié à un autre gaz. Pour les applications microélectroniques, un des pré-requis est l'obtention, après gravure, d'une surface plane et peu endommagée.

La gravure ionique peut être utilisée soit pour la réalisation de composants, soit pour attaquer la couche superficielle d'un échantillon abimé (par un polissage mécanique, par exemple).

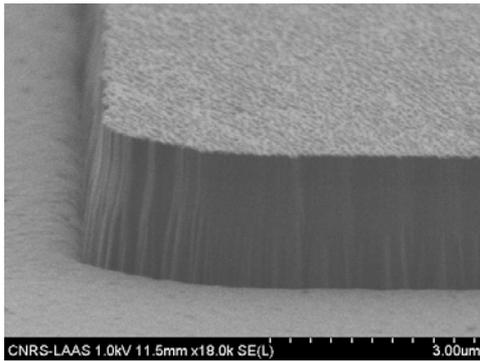


figure 4 : photographie MEB d'un profil de gravure RIE

La Fig. 4 présente la photo MEB d'une marche réalisée dans du diamant par gravure ionique. Les flancs sont verticaux et l'état de surface de la partie gravée est bon. On voit, au niveau de la marche, que le processus a provoqué une légère surgravure ("trenching"), caractéristique d'une gravure énergétique.

Mise en place d'une base 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 l'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 (λ_{th}), la permittivité diélectrique (ϵ_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 (α_n et α_p) nécessaires au calcul de la tension de claquage ou encore celle de la durée de vie des porteurs (τ_n et τ_p) permettant de calculer le taux de recombinaison. Les valeurs de mobilité (μ_p et μ_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 (μ_p) est étudiée. Le graphe présenté (Fig. 5) 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 (Equation 1) utilisé dans le logiciel nous avons donc "fité" ces points expérimentaux. Les valeurs des paramètres obtenus sont présentées dans le tableau 1.

$$\mu = \mu_{min1} \cdot \exp\left(\frac{-Pc}{Ni}\right) + \frac{\mu_{const} - \mu_{min2}}{1 + \left(\frac{Ni}{Cr}\right)^\alpha} \quad \mu_{const} = \mu_{max} \left(\frac{T}{300}\right)^\xi \quad (1)$$

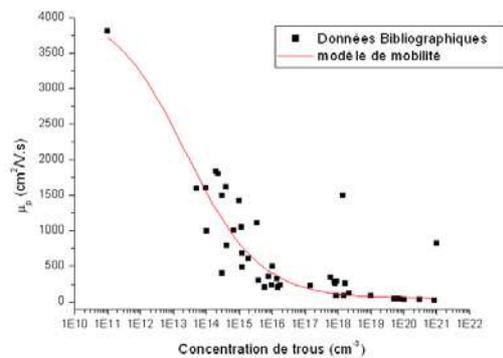


Figure 5 : Variation de la mobilité en fonction de la densité de porteurs

Le fichier de paramètres ainsi complété, nous avons simulé une structure simple, qui est une partie d'un motif TLM présenté précédemment. Les résultats obtenus par simulation sont très différents de ceux obtenus expérimentalement. En dégradant de manière significative la mobilité (division par 10) nous obtenons des résultats plus proches des résultats expérimentaux. 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. Des mesures approfondies s'avèrent nécessaires afin d'obtenir des valeurs de mobilité plus cohérentes.

Paramètre	Valeur
μ_{\max} (cm ² /V.s)	1800
$\mu_{\min1}$ (cm ² /V.s)	0
$\mu_{\min2}$ (cm ² /V.s)	0
Pc (cm ⁻³)	0
Cr (cm ⁻³)	2,78.10 ¹⁵
α	0,39

Tableau 1 : Paramètres du modèle de mobilité

MANAGEMENT THERMIQUE

Les limites actuelles des composants silicium sont étroitement liées à l'environnement du composant. L'augmentation de la densité de courant dans le composant passe par la capacité de l'environnement à évacuer les pertes de ce composant pour limiter son échauffement. Le souci du concepteur de système de puissance est donc de réduire au maximum la résistance thermique entre le composant et l'extérieur. Les propriétés du diamant, meilleur conducteur thermique et meilleur isolant électrique, font de ce matériau un candidat idéal pour ces problèmes de management thermique. Ceci a déjà été utilisé avec succès dans différentes applications de la micro électronique.

Les études que nous souhaitons mener ici consistent à rechercher les techniques de report de diamant sur les zones à fortes contraintes thermiques ou diélectriques. Ces techniques devront être optimales pour ne pas augmenter le coût de réalisation. Le dépôt direct par voie chimique en phase vapeur (CVD) est envisageable si les composants supportent la température de dépôt (800 °C). Ce sera le cas sur des semiconducteurs grand gap (SiC, ...). Pour le silicium, une telle température peut entraîner une modification des structures de composants par diffusion des dopants, on pourra alors utiliser des techniques de report et de brasures.

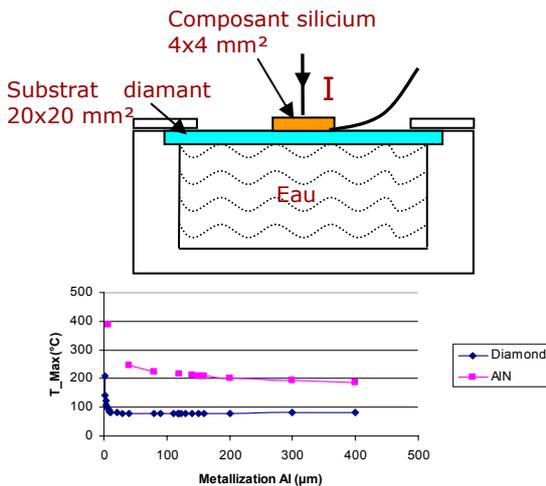


Figure 6 : principe de test retenu et résultats obtenus. Ce résultat montre un gain 2 à 4 par rapport aux technologies AlN les plus performantes

Nous avons évalué une première solution qui permet d'extraire des densités de puissance supérieures à 400W/cm².

La Fig. 6 montre notre principe de test et les résultats

obtenus. Le composant silicium est disposé sur le substrat en diamant en contact direct avec l'eau du circuit de refroidissement. Les métallisations Aluminium d'aménée de courant sont également refroidies.

Ces résultats font clairement apparaître une diminution de l'échauffement du composant déposé sur un substrat diamant.

Il reste à caractériser la tenue mécanique et la durée de vie de ces assemblages dans des contraintes sévères de température et de cyclages thermiques.

CONCLUSION

Dans ce papier, nous avons présenté nos recherches concernant l'utilisation du diamant en électronique de puissance. Les travaux sur les procédés technologiques nécessaires à son utilisation pour la fabrication de composants électroniques donnent des résultats intéressants. Une base de simulation est actuellement mise en place. Elle a révélé une certaine inadéquation entre les résultats attendus et les résultats expérimentaux. Ceci montre la nécessité d'améliorer encore la qualité cristalline des couches de diamant, mais aussi la nécessité de mieux comprendre les phénomènes liés aux défauts subsistants dans la couche. Une étude sur l'utilisation du diamant pour le management thermique démontre l'intérêt qu'il peut avoir dans ce type d'application. D'autres études doivent être menées dans des conditions de température sévères pour démontrer les performances de la technique proposée.

REFERENCES

- [1] H. Schneider, J.L. Sanchez, J. Achard, "The diamond for power electronic devices", EPE'2005, Dresden, Germany, September 2005
- [2] C.E. Nebel, "Electronic properties of CVD diamond", Semicond. Sci. Technol., 2003
- [3] C. Uzan Seguy, C. Cytermann, R. Brenner, V. Richter, M. Shaanan, R. Kalish, "Damage threshold for ion-beam induced graphitization of diamond", App. Phys. Lett., Volume 67, Issue 9, 1995, pp. 1194-1196
- [4] 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
- [5] 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
- [6] M. Werner, "Diamond metallization for device applications", Semicon. Sci. and Technol., Volume 18, Number 3, 2003, pp. S41-S46
- [7] M. Wade, P. Muret, F. Omnès, A. Deneuille, "Technology and electrical properties of ohmic contacts and schottky diodes on homoepitaxial layers grown on (1,1,0) diamond surfaces", Diam Rel. Mat., Volume 15, Issues 4-8, 2006, Pages 614-617