

Fabrication et caractérisation de diodes Schottky diamant protégées par plaque de champ avec empilement $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$

Rachel GROSSET-DARRACQ^{1,2}, Karine ISOIRD¹, Cédric MASANTE², Josiane TASSELLI¹, Daniel ROULY¹, Richard MONFLIER¹, Sandrine ASSIE-SOULEILLE¹

¹LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, UPS, Toulouse, France

²Univ. Grenoble Alpes, CEA, Leti, F-38000 Grenoble, France

RESUME – Dans le cadre du projet FrenchDiam, cette étude a pour but de proposer une protection périphérique par plaque de champ (Field Plate, FP) appliquée à la diode Schottky diamant de type P. Le diélectrique de la FP comporte un empilement $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$, deux matériaux à forte permittivité sélectionnés pour augmenter la tenue en tension de la diode. Les performances de l'empilement $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$ ont d'abord été évaluées par mesures C-V sur Silicium. Suite à la fabrication en salle blanche, des caractérisations électriques ont été réalisées afin d'étudier le comportement des diodes sous polarisation directe et inverse.

Mots-clés — Diamant, Diode Schottky, Protection périphérique, Plaque de champ, Diélectrique, caractérisations électriques.

1. INTRODUCTION

Dans un contexte d'électrification de nos sociétés, l'électronique de puissance joue un rôle de plus en plus fondamental. Les limites intrinsèques du Silicium ont conduit à l'étude de semi-conducteurs à large bande interdite (« grand gap ») tels que le GaN ou le SiC, qui ont démontré des tenues en tension supérieures à celles du Silicium [1].

Considéré comme un matériau à très large bande interdite (ultra grand gap), le diamant représente le candidat idéal pour des applications de forte puissance et de haute température. Parmi ses propriétés remarquables figurent son champ critique (10 MV.cm^{-1}) théoriquement 30 fois supérieur à celui du Silicium ainsi que sa conductivité thermique ($22 \text{ W.cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) près de 5 fois supérieure à celle du cuivre. Néanmoins, la limitation de la tenue en tension représente un verrou majeur au développement des composants en diamant. L'absence de terminaison de jonction efficace favorise notamment la concentration du champ électrique en périphérie du composant, conduisant ainsi à un claquage prématuré.

Les contraintes de dopage de type N au phosphore [2][3] compliquent l'emploi de terminaisons périphériques typiques utilisant des dopages localisés de type N (ex : JTE, anneaux de garde, etc.) [4][5]. En l'absence de procédés d'implantation ionique adaptés au diamant [6], la plaque de champ (Field Plate, FP) apparaît comme une solution de protection périphérique technologiquement envisageable.

Dans le cas d'une diode Schottky, la plaque de champ permet de réduire l'intensité du champ électrique aux extrémités du contact Schottky et de le reporter en bord de plaque. Cependant, plusieurs études de diodes Schottky en diamant de type P protégées par FP témoignent de faibles tenues en tension, dues à l'emploi de diélectriques à faible permittivité [7][8]. Pour y remédier, nous proposons une configuration de FP basée sur un empilement $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$ présentant des permittivités élevées.

Après avoir introduit le dimensionnement des diodes Schottky, l'évaluation des performances de l'empilement $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$ par mesures C-V sur Silicium sera présentée. Puis, après avoir exposé les caractérisations optiques de l'échantillon diamant et les étapes de fabrication des composants, les caractérisations électriques des dispositifs seront détaillées.

2. DIMENSIONNEMENT DE DIODE SCHOTTKY 2 KV

2.1. Calcul de la tenue en tension d'une diode Schottky 1D

Avant le choix des diélectriques de la FP, la tenue en tension V_{BR} idéale d'une diode Schottky de type P peut être calculée en 1D (Fig. 1), en fonction de la concentration de dopants N_a (cm^{-3}) et de l'épaisseur w_D (cm) de la couche P- faiblement dopée [9][10].

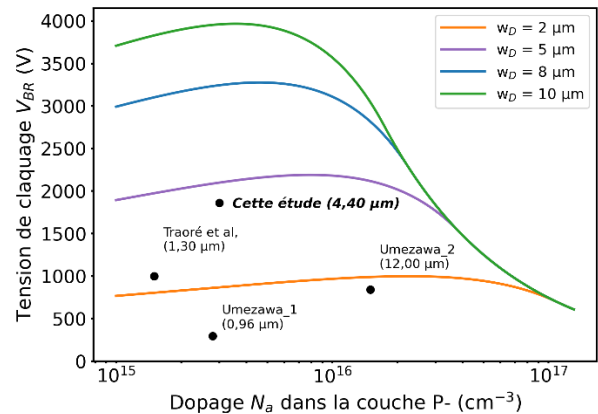


Fig. 1. Evolution de la tenue en tension pour une diode Schottky de type P calculée en 1D en fonction de l'épaisseur et du dopage de la couche P- (Données expérimentales issues de [11][12][13]).

Afin de ne pas surestimer le dimensionnement des paramètres physiques de la diode, cette évaluation de la tenue en tension est basée par précaution sur une estimation basse du champ critique, calculée à partir de données expérimentales mesurées pour le diamant [14]. La dépendance du champ critique (E_c) avec le dopage a été prise en compte ($E_c \propto N_a^{1/8}$) [10].

L'échantillon diamant utilisé présente une épaisseur de $4,4 \mu\text{m}$ de la couche P- et un dopage de $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, confirmé par mesures SIMS (Fig. 4). Ces paramètres permettent ainsi de viser une tenue en tension théorique (BV_0) de l'ordre de 2kV avec une résistance à l'état passant estimée ici à $15 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ à 300 K et à $5 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ à 450 K, en supposant l'absence de compensation [9].

2.2. Influence des diélectriques sur la tenue en tension

A l'interface entre le diamant et le matériau diélectrique de la FP, la continuité des composantes tangentielles du champ électrique impose une relation directe entre les champs dans les deux milieux, exprimée par :

$$E_{\text{diélectrique}} = \frac{\epsilon_{\text{diamant}}}{\epsilon_{\text{diélectrique}}} E_{\text{diamant}} \quad (1)$$

Où E_{diamant} et $E_{\text{diélectrique}}$ désignent les champs électriques (exprimés en MV/cm) dans le diamant et le diélectrique, respectivement, et $\epsilon_{\text{diamant}}$, $\epsilon_{\text{diélectrique}}$ représentent leurs permittivités relatives. Cette relation souligne l'importance d'employer un matériau diélectrique de permittivité supérieure à celle du diamant ($\epsilon = 5,7$) pour réduire la concentration du champ électrique dans le diélectrique et favoriser une répartition plus homogène entre les deux milieux [15].

L' Al_2O_3 est un diélectrique à forte permittivité ($\epsilon = 9$) pouvant se déposer par ALD (Atomic Layer Deposition), ce qui offre une excellente qualité du matériau mais limite l'épaisseur déposée à quelques dizaines de nm [16]. Afin de renforcer la tenue en tension globale du diélectrique de la FP, une couche de Si_3N_4 ($\epsilon = 7,25$) déposée par ICPECVD (Inductive Coupled Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) est ajoutée au-dessus de celle d' Al_2O_3 (Tableau 1). En raison des contraintes technologiques de dépôt des diélectriques et de l'impact sur l'efficacité de la terminaison de jonction, des épaisseurs de 20 et 200 nm ont été retenues pour l'empilement $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$, qui constitue la couche isolante de la FP.

En outre, le champ de rupture élevé de l' Al_2O_3 et du Si_3N_4 est également un critère déterminant afin de limiter le risque de claquage prématuré de l'isolant de la FP. En supposant un claquage du diamant à 2kV (Fig. 1), les champs électriques dans chaque couche, estimés à partir des équations de continuité, sont inférieurs à leurs champs de rupture (Tableau 1), ce qui suggère une bonne tenue diélectrique de l'empilement.

Tableau 1. Paramètres des diélectriques employés pour les plaques de champ

Diélectrique	Technique de dépôt	Épaisseur choisie (nm)	Champ de rupture (MV/cm)	Champ dans le diélectrique calculé au claquage (MV/cm)
Al_2O_3	ALD	20	9 [16]	2,7
Si_3N_4	ICPECVD	200	7 [17]	3,3

3. PROCEDE TECHNOLOGIQUE

Préalablement à la fabrication en salle blanche des diodes, plusieurs caractérisations ont été menées afin d'évaluer les performances des diélectriques de la FP et de l'échantillon diamant utilisé.

3.1. Evaluation des performances de l'empilement $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$ sur Silicium

L' Al_2O_3 est un matériau dont les propriétés physiques peuvent varier avec la température [16][18]. Il subit donc généralement un recuit suite à son dépôt par ALD afin d'améliorer l'interface avec le semi-conducteur, de diminuer le nombre de charges piégées et par la suite les courants de fuite [19]. Après plusieurs essais sur Silicium, un point recuit optimal de l' Al_2O_3 a été trouvé pour 30 min à 450°C sous $\text{N}_2\text{-H}_2$ et sera retenu pour le diamant. En comparaison avec l' Al_2O_3 non recuit,

ce recuit montre une amélioration des caractéristiques C-V, mesurées par sonde à mercure, avec un profil moins étendu le long de l'axe des tensions, synonyme d'une diminution de la quantité de charges à l'interface (Fig. 2). L'hystérésis est peu prononcée, témoignant d'une faible quantité de charges mobiles. Les caractérisations C-V de l'empilement $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$ affichent un profil similaire à l' Al_2O_3 seul après recuit, montrant ainsi que la couche supplémentaire de Si_3N_4 ne dégrade pas la qualité du diélectrique de la FP par l'ajout de charges parasites.

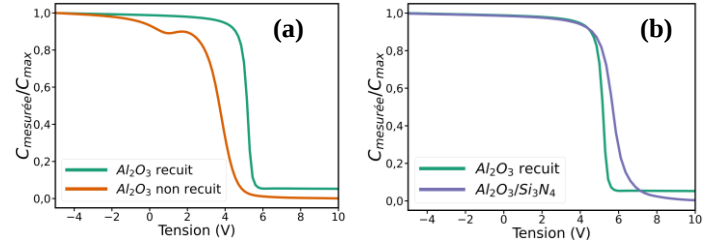


Fig. 2. Comparaison des caractéristiques C-V sur Si de l' Al_2O_3 recuit (30 min à 450°C sous $\text{N}_2\text{-H}_2$) et non recuit (a) et des caractéristiques C-V de l' Al_2O_3 recuit et de l'empilement $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$ (b) - mesures à 100 kHz de -5 à 10 V.

3.2. Caractérisation de l'échantillon par photoluminescence

Les cartographies obtenues par photoluminescence ont mis en évidence une bande de luminescence à la longueur d'onde d'émission $\lambda = 530$ nm, dont l'intensité augmente au centre de l'échantillon (Fig. 3). Cette bande de luminescence pourrait être révélatrice de défauts liés à des lacunes d'azote [20], dont la concentration serait plus importante au centre. Ces observations sont comparées aux caractérisations électriques afin d'analyser l'impact éventuel sur le comportement des diodes.

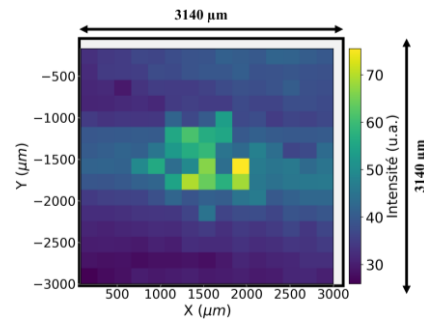


Fig. 3. Cartographie par photoluminescence de l'intensité lumineuse émise par l'échantillon diamant ($3140 \times 3140 \mu\text{m}^2$) à $\lambda = 530$ nm (longueur d'onde d'excitation : $\lambda = 217$ nm ; diamètre théorique du spot : 266 nm ; pas de déplacement pour la mesure : 200 μm).

3.3. Etapes de fabrication en salle blanche des composants

L'échantillon utilisé a été fabriqué par le laboratoire LSPM. Il est constitué d'une couche P+ de 4,5 μm dopée à $9.10^{19} \text{ cm}^{-3}$ et d'une couche P- de 4,4 μm dopée à $3.10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (Fig. 4).

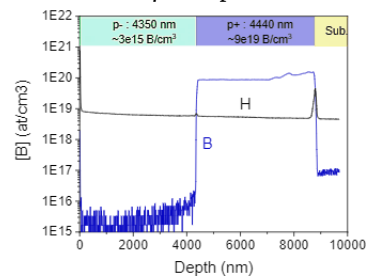


Fig. 4. Analyse SIMS de l'échantillon effectuée par le laboratoire GEMaC

En premier lieu, l'échantillon est nettoyé avec une succession de bains d'acides ($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$, HF, HF + HNO_3 , HCl + HNO_3 , HCl dilué) pour éliminer les contaminations organiques et métalliques. Après gravure RIE (Reactive Ion Etching) du diamant par O_2 jusqu'au P+ avec un masque de SiO_2 (200 nm) pour l'ouverture du contact ohmique, un nettoyage BOE (1 : 7) est effectué pour retirer le SiO_2 . Un traitement de surface UV ozone (UV/O_3) [17][21] est réalisé avant dépôt par ALD à 300°C de 20 nm d' Al_2O_3 , qui est ensuite recuit pendant 30 min à 450°C sous N_2 . En suivant, une couche de 200 nm de Si_3N_4 est déposée par ICPECVD à 100°C . Une photolithographie par écriture laser suivie des gravures sèche du Si_3N_4 , par CF_4 , et humide de l' Al_2O_3 , par H_3PO_4 , permettent de définir les motifs de diodes pour différentes longueurs de FP (0, 5, 10, 15, 20 et 30 μm) ainsi que ceux des capacités MIS (Métal-Isolant-Semiconducteur) et MIM (Métal-Isolant-Métal). Le contact ohmique est réalisé par lift-off du Ti/Pt/Au (50/50/450 nm), suivi d'un recuit d'une heure à 450°C sous N_2 . Enfin, le contact Schottky est formé par un lift-off du Ni/Au (50/450 nm) (Fig. 5).

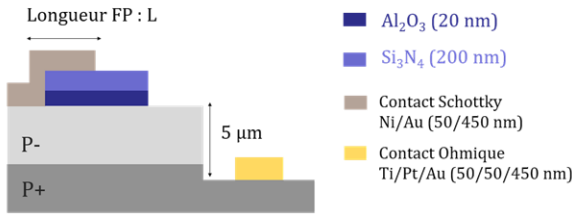


Fig. 5. Vue en coupe d'une diode protégée par plaque de champ avec l'empilement $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$.

Le respect des tolérances d'alignement entre les motifs des diélectriques et des contacts Schottky permet de conserver les longueurs de FP définies sur le masque de fabrication et d'assurer une répartition uniforme sur toute la périphérie de la diode (Fig. 6). L'échantillon est constitué d'un réticule type, répliqué neuf fois. Chaque réticule intègre des diodes avec les différentes longueurs de FP, une capacité MIS ainsi qu'une capacité MIM pour les réticules situés dans les coins. Des motifs cTLMs (circular Transfer Length Method) ont également été ajoutés pour la caractérisation du contact ohmique.

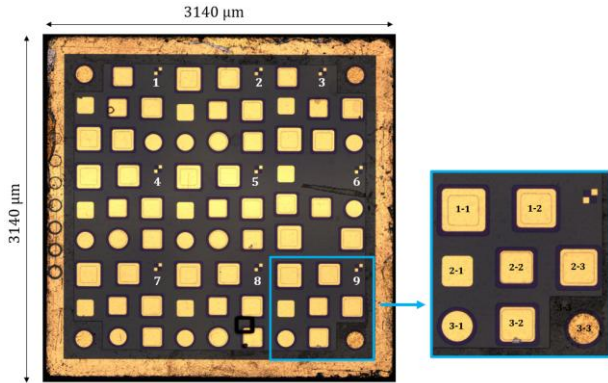


Fig. 6. Echantillon en fin de fabrication et nomenclature des composants (format : ligne – colonne) sur chaque réticule (numéroté de 1 à 9). Ici, les positions 1-1, 1-2, 2-1, 2-2, 2-3, 3-2 et 3-3 correspondent aux diodes avec des longueurs de FP respectives de 30, 20, 0, 5, 15 et 10 μm . Les positions 3-1 et 3-3 désignent les capacités MIS et MIM. Sur les réticules 2, 4, 5, 8, la capacité MIM est remplacée par une diode circulaire avec FP.

4. CARACTERISATIONS ELECTRIQUES

A l'issue de la fabrication en salle blanche, des caractérisations électriques ont été réalisées afin d'étudier le comportement des diodes sous polarisation directe et inverse. L'ensemble des mesures I-V dans l'air ont été effectuées à l'aide d'une station sous-pointes MPI TS2000 reliée à un analyseur de composant Keysight B1500A.

4.1. Mesures I-V des diodes sous polarisation directe

4.1.1. Résultats à température ambiante

Les mesures de courant sous polarisation directe confirment le fonctionnement des diodes avec une tension de seuil d'environ 2V (Fig. 7). Toutefois, la densité de courant mesurée à 5V (en dessous de 10^{-1} A/cm²) est significativement inférieure aux valeurs rapportées dans la littérature [11][13][22], ce qui indique la présence d'une résistance importante à l'état passant ou d'une recombinaison en surface liée à des pièges (ex : Fig. 3). De plus, les mesures en aller-retour entre 0 et 5V montrent un phénomène d'hystérésis, accompagné d'un décalage de la tension de seuil. Ce comportement suggère la présence de charges piégées à l'interface entre le diamant et le Nickel du contact Schottky. La hauteur de barrière extraite pour les diodes est en moyenne de 1,66 eV, en bon accord avec les valeurs observées dans la littérature (1,54 eV [22][23]).

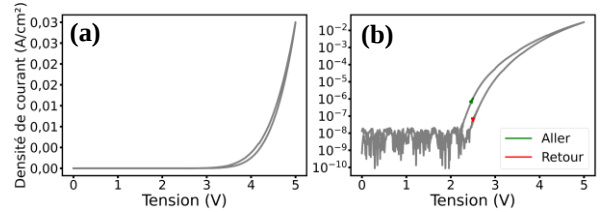


Fig. 7. Exemple de mesure I-V sous polarisation directe à 25°C (Diode 3-3, Réticule 2, Catégorie 1) – Echelles linéaire (a) et logarithmique (b)

4.1.2. Evolution en température sous polarisation directe

Les mesures en température, effectuées entre 25°C et 150°C , indiquent une augmentation significative de la densité de courant, passant de 30 mA/cm² à 25°C à 6,5 A/cm² à 150°C (Fig. 8). Cette évolution provient principalement de l'activation thermique des dopants dans la couche P-, qui contribuent à diminuer la résistivité. Par ailleurs, la tension de seuil diminue avec la température en se rapprochant de 1V à 150°C , ce qui est causé par un renforcement de l'émission thermoionique à travers la barrière Schottky. La hauteur de barrière de cette diode extraite des caractéristiques I-V diminue également, de 1,3 eV à 25°C à environ 1 eV à 150°C , ce qui est notamment issu de la diminution du gap avec la température.

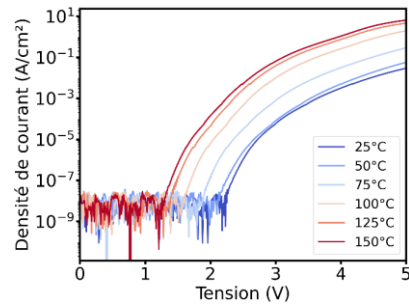


Fig. 8. Evolution en température de 25°C à 150°C du courant sous polarisation directe jusqu'à 5V (Diode 3-3, Réticule 2, Catégorie 1)

4.2. Mesures I-V des diodes sous polarisation inverse

4.2.1. Evaluation des fuites à température ambiante

Les courants de fuite sous polarisation inverse dans l'air jusqu'à 80 V ont été mesurés pour l'ensemble des diodes. Trois comportements principaux ont été identifiés :

- Catégorie 1 (35/56 diodes) : diodes présentant de faibles courants de fuites jusqu'à 80V (inférieurs à 10^{-6} A/cm²), avec une légère augmentation entre 40V et 60V (Fig. 9).

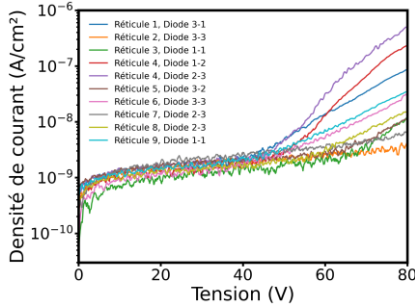


Fig. 9. Exemples de comportement sous polarisation inverse jusqu'à 80 V des diodes de la catégorie 1 (faibles courants de fuite)

- Catégorie 2 (16/56 diodes) : diodes dont le courant de fuite augmente progressivement, jusqu'à atteindre la limite de courant (compliance). Leur seuil de déclenchement est situé en dessous de 40V et diffère d'une diode à l'autre (Fig. 10).

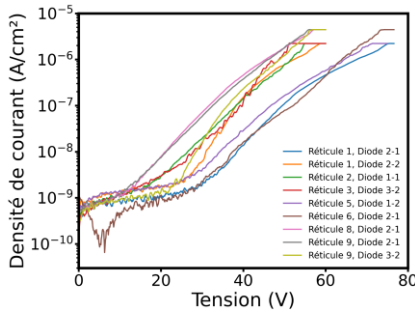


Fig. 10. Exemples de comportement sous polarisation inverse jusqu'à 80 V des diodes de la catégorie 2 (courants de fuite augmentant progressivement)

- Catégorie 3 (5/56 diodes) : diodes affichant une augmentation abrupte du courant de fuite entre 60 et 70 V (Fig. 11). Cette augmentation intervient de façon précoce avant 15V pour la diode 1-1 du réticule 5, localisée sur une zone de forte luminescence au centre de l'échantillon (Fig. 3).

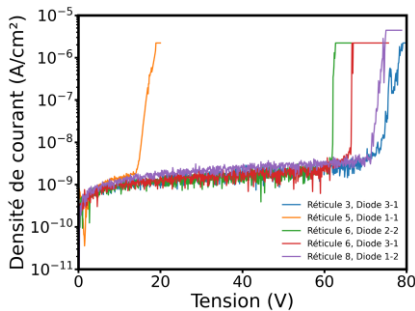


Fig. 11. Comportement sous polarisation inverse jusqu'à 80 V des diodes de la catégorie 3 (courants de fuite présentant une augmentation abrupte)

4.2.2. Evolution en température des courants de fuite des diodes de catégorie 1

Des mesures de courant de fuite sous polarisation inverse ont été réalisées pour les diodes de la catégorie 1 dans l'air entre 25°C et 150°C (Fig. 12). Ces diodes présentent une bonne stabilité thermique, avec un courant de fuite qui reste toujours faible à 150°C (ici égal à $1,2 \cdot 10^{-8}$ A/cm² pour la diode 3-3 du réticule 2).

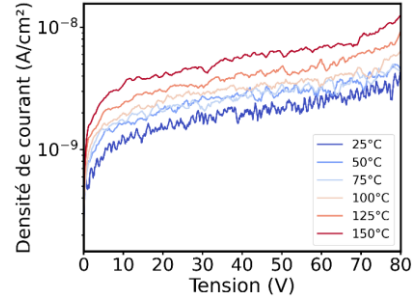


Fig. 12. Evolution en température de 25°C à 150°C des courants de fuite sous polarisation inverse jusqu'à 80 V (Diode 3-3, Réticule 2, Catégorie 1)

4.2.3. Mesures I-V sous vide des diodes de catégorie 1

En raison de leurs faibles courants de fuite et de leur stabilité en température, les diodes de la catégorie 1 ont été retenues pour des mesures de courant sous polarisation inverse à plus haute tension. Les caractérisations électriques ont été réalisées sous vide secondaire ($7,8 \cdot 10^{-4}$ Torr) à l'aide d'une station sous-pointes Everbeing CG-196, couplée à une source-mesure KEITHLEY 2657A. Dans un premier temps, les diodes 1-1, 2-1 et 2-2 du réticule 4, ayant respectivement une longueur de FP de 30, 0 et 5 μ m, ont été caractérisées. Les diodes 1-1 et 2-2 montrent une augmentation abrupte du courant de fuite à 120V contre 150V pour la diode 2-1 non protégée (Fig. 13). Après répétition des mesures, une augmentation précoce du courant de fuite apparaît (entre 5 et 30V), synonyme d'une dégradation des dispositifs. C'est pourquoi, avant de poursuivre les essais sur les autres diodes, des caractérisations complémentaires sont prévues afin d'identifier les mécanismes à l'origine de ces fuites prématurées.

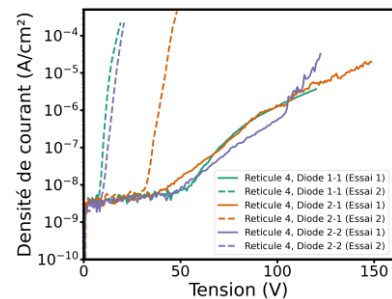


Fig. 13. Mesures I-V sous polarisation inverse sous vide pour 3 diodes de la catégorie 1 : Diodes 1-1, 2-1 et 2-2 (Réticule 4) de longueurs de FP respectives 30, 0 et 5 μ m – 2^e essai en pointillés

4.3. Mesures I-V sous vide des capacités MIS

Afin d'évaluer les performances de la protection périphérique par plaque de champ en Al₂O₃/Si₃N₄, des mesures sous vide ont été réalisées sur les capacités MIS. Dans un premier temps, les courants de fuite sous polarisation inverse ont été mesurés jusqu'à 200 V (Fig. 14a).

L'évolution des courants de fuite jusqu'à 200V est variable selon les capacités. La capacité du réticule 2 a présenté une augmentation abrupte du courant de fuite vers 50 V. La capacité du réticule 5, présentant les fuites les plus faibles à 200 V, a été soumise à une montée en tension jusqu'à 500V (Fig. 14b). Toutefois, une augmentation de son courant de fuite apparaît à partir de 200V. Après répétition de la mesure, son courant de fuite augmente fortement dès 50V, de façon similaire à la capacité du réticule 2, au lieu de 200V, suggérant une dégradation de la structure après l'essai.

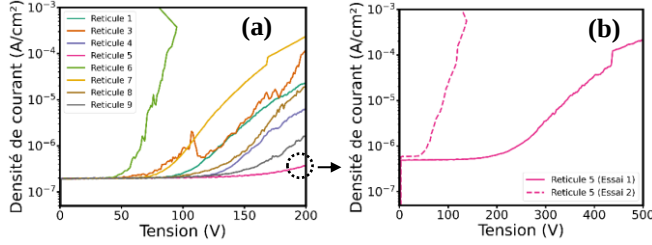


Fig. 14. Courants de fuite sous polarisation inverse jusqu'à 200 V des capacités MIS (a) et jusqu'à 500V pour la capacité du réticule 5 (b)

4.4. Caractérisations C-V des diodes non protégées

La caractérisation du contact ohmique par mesures cTLM a révélé un comportement résistif, mis en évidence par une courbe I-V non linéaire, y compris à des températures élevées allant jusqu'à 150 °C. Ce comportement suggère la présence d'une résistance série non-négligeable, liée à la résistance du contact. Ceci complique l'analyse par mesure C-V réalisée à partir d'un modèle équivalent à 2 éléments (Résistance parallèle-Capacité parallèle : C_p - R_p). Les mesures C-V effectuées sur les diodes non protégées indiquent une variation de la capacité de $4,45 \cdot 10^{-13}$ F à $4,15 \cdot 10^{-13}$ F entre 0 et 40V en régime de déplétion (Fig. 15). Dans le cas idéal, sans résistance série, la capacité devrait évoluer entre $1,7 \cdot 10^{-12}$ et $4,5 \cdot 10^{-13}$ F sur la même plage de tension (Fig. 15).

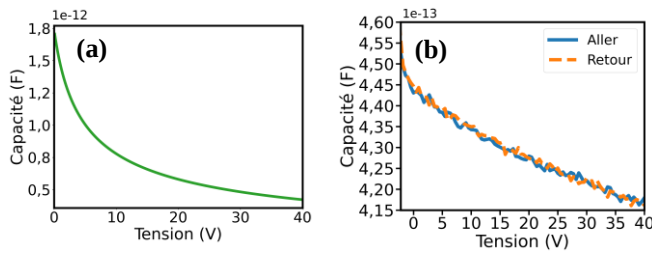


Fig. 15. Caractéristiques C-V théorique (a) et expérimentale (fréquence 1 MHz) (b) d'une diode non protégée (Diode 2-1, Réticule 1)

En plus de l'effet de la résistance série, cette faible variation de capacité pourrait indiquer la présence :

- De charges fixes (Q_f) localisées à l'interface métal-diamant, conduisant à un décalage en tension (ΔV) du profil C-V,
- et/ou de pièges (de densité effective N_f) répartis dans le semi-conducteur ou proches de l'interface, induisant un étalement du profil C-V.

Ces deux effets peuvent être pris en compte dans une expression modifiée de la capacité C-V d'un contact Schottky :

$$C_{modifiée}(V) = \sqrt{\frac{q(N_{A^-} + N_f)\epsilon_s}{2(V + \Delta V)}}$$

Où V (en volts) représente la tension appliquée et ΔV le décalage de tension associé aux charges fixes. N_{A^-} (cm^{-3}) correspond au dopage effectif de la couche P- et N_f (cm^{-3}) à la concentration effective de pièges. ϵ_s ($\text{F} \cdot \text{cm}^{-1}$) désigne la permittivité du semi-conducteur diamant. Ici, le décalage en tension ΔV serait négatif, ce qui indiquerait la présence de charges fixes positives par analogie avec des structures MIS. L'origine physique de ces pièges d'interface et dans le semi-conducteur fera l'objet d'une étude plus approfondie, notamment par des mesures électriques complémentaires ainsi que des caractérisations physiques et optiques (ex : Fig. 3).

De façon similaire aux diodes, les mesures C-V réalisées sur les capacités MIS n'affichent uniquement qu'un régime de déplétion profonde sans accumulation. Il est donc difficile d'exploiter ces caractéristiques C-V pour évaluer la densité de charges et d'états d'interface liées aux isolants de la FP.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Une architecture de terminaison périphérique par plaque de champ a été proposée pour les diodes Schottky en diamant de type p, reposant sur un empilement diélectrique $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$ de 20/200 nm. Ce choix est motivé par les permittivités relatives élevées de ces diélectriques et leurs champs de rupture compatibles avec une tenue en tension cible de 2 kV.

Les caractérisations sous polarisation directe indiquent que les diodes sont fonctionnelles avec néanmoins une faible densité de courant à l'état passant en comparaison avec la littérature. De plus, l'hystérésis observé traduit une instabilité, liée à la présence probable de charges à l'interface Nickel/diamant. Cette hypothèse est aussi renforcée par un décalage négatif du profil C-V des diodes, suggérant la présence de charges fixes positives à l'interface Nickel/diamant.

Les mesures de courant de fuite sous polarisation inverse révèlent différents comportements, avec une catégorie de diodes dont les fuites restent faibles à 80V et stables en température. Toutefois, pour trois diodes de cette catégorie, le courant de fuite mesuré sous vide croît fortement entre 120V et 150V. De plus, leur courant de fuite augmente de façon prématurée après répétition des essais, synonyme d'une dégradation des diodes.

Les mesures sur les capacités MIS réalisées sous vide jusqu'à 200V montrent une dispersion de leur courant fuite, ce qui suggère un impact non négligeable de la qualité d'interface ou de défauts dans les diélectriques.

Par conséquent, afin de diminuer ces courants de fuite et de stabiliser le comportement électrique des dispositifs, un recuit est envisagé à la fois pour améliorer la qualité de l'interface Nickel/diamant des diodes Schottky et pour réduire les défauts résiduels dans les diélectriques. A l'issue de cette étape, les tests de tenue en tension sous polarisation inverse seront menés afin d'évaluer le meilleur design de FP. En outre, les investigations continuent afin de limiter l'impact des défauts lié au procédé technologique (pièges à l'interface et dans les diélectriques) dans le but d'évaluer les performances de la protection périphérique.

Enfin, les défauts intrinsèques au matériau diamant peuvent également affecter les performances des composants et être à l'origine de courants de fuite prématurés. Avant fabrication des dispositifs, il est donc essentiel d'implémenter plusieurs étapes systématiques de qualification des échantillons (ex : caractérisations optiques par photoluminescence couplée à d'autres techniques) afin d'orienter le choix des structures.

6. REMERCIEMENTS

Ce travail est réalisé dans le cadre du projet FRENCHDIAM et a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre de France 2030, référencée ANR-23-PEEL-0001. Ce travail est soutenu par la plateforme de micro et nanotechnologies du LAAS-CNRS, membre du réseau français RENATECH et par la plateforme de caractérisation PROOF. Les auteurs tiennent également à remercier les laboratoires LSPM pour la fourniture de l'échantillon et GEMaC pour l'analyse SIMS.

7. REFERENCES

- [1] N. Donato, N. Rouger, J. Pernot, G. Longobardi, et F. Udrea, « Diamond power devices: state of the art, modelling, figures of merit and future perspective », *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 53, n° 9, p. 093001, févr. 2020, doi: 10.1088/1361-6463/ab4eab.
- [2] M.-A. Pinault-Thaury et al., « Phosphorus-doped (113) CVD diamond: A breakthrough towards bipolar diamond devices », *Applied Physics Letters*, vol. 114, no. 6, p. 062101, 2019.
- [3] A. Traoré, S. Koizumi, and J. Pernot, « Effect of n- and p-type doping concentrations and compensation on the electrical properties of semiconducting diamond: Electrical properties of semiconducting diamond », *Phys. Status Solidi A*, vol. 213, no. 8, pp. 2036–2043, Aug. 2016, doi: 10.1002/pssa.201600407.
- [4] D. C. Sheridan, G. Niu, and J. D. Cressler, « Design of single and multiple zone junction termination extension structures for SiC power devices », *Solid-State Electronics*, vol. 45, no. 9, pp. 1659–1664, 2001.
- [5] D. C. Sheridan, G. Niu, J. N. Merrett, J. D. Cressler, C. Ellis, and C.-C. Tin, « Design and fabrication of planar guard ring termination for high-voltage SiC diodes », *Solid-State Electronics*, vol. 44, no. 8, pp. 1367–1372, 2000.
- [6] D. Zhao, Z. Liu, J. Wang et al., « Performance improved vertical diamond Schottky barrier diode with fluorination-termination structure », *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 40, no. 8, pp. 1229–1232, 2019.
- [7] T. Hanada, S. Ohmagari, J. H. Kaneko, et H. Umezawa, « High yield uniformity in pseudo-vertical diamond Schottky barrier diodes fabricated on half-inch single-crystal wafers », *Applied Physics Letters*, vol. 117, n° 26, p. 262107, déc. 2020, doi: 10.1063/5.0027729.
- [8] F. Thion, « Conception de protections périphériques applicables aux diodes Schottky réalisées sur diamant monocristallin », Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2012.
- [9] N. Rouger et A. Maréchal, « Design of Diamond Power Devices: Application to Schottky Barrier Diodes », *Energies*, vol. 12, n° 12, p. 2387, juin 2019, doi: 10.3390/en12122387.
- [10] O. Slobodyan et al., « Analysis of the dependence of critical electric field on semiconductor bandgap », *Journal of Materials Research*, vol. 37, n° 4, p. 849–865, févr. 2022, doi: 10.1557/s43578-021-00465-2.
- [11] H. Umezawa, K. Ikeda, R. Kumaresan, N. Tatsumi, and S.-i. Shikata, « Increase in reverse operation limit by barrier height control of diamond Schottky barrier diode », *IEEE Electron Device Letters*, vol. 30, no. 9, pp. 960–962, 2009.
- [12] H. Umezawa, Y. Kato, and S.-i. Shikata, « 1 Ω on-resistance diamond vertical-Schottky barrier diode operated at 250°C », *Applied Physics Express*, vol. 6, no. 1, p. 011302, 2012.
- [13] A. Traoré, P. Muret, A. Fiori, D. Eon, E. Gheeraert, and J. Pernot, « Zr/oxidized diamond interface for high power Schottky diodes », *Applied Physics Letters*, vol. 104, no. 5, p. 053508, 2014.
- [14] « Blocking characteristics of diamond junctions with a punch-through design », *Journal of Applied Physics*, vol. 117, n° 12, p. 124503, mars 2015, doi: 10.1063/1.4916240.
- [15] K. Ikeda, H. Umezawa, et S. Shikata, « Edge termination techniques for p-type diamond Schottky barrier diodes », *Diamond and Related Materials*, vol. 17, n° 4-5, p. 809–812, avr. 2008, doi: 10.1016/j.diamond.2007.12.066.
- [16] A. Lale, « Développement de transistors à effet de champ à base de nanofils de silicium pour la détection en phase liquide », Thèse de doctorat, Université Toulouse 3, 2017.
- [17] L. Fontaine, « Développement de briques technologiques pour la réalisation de composants de puissance MOS sur diamant », Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2020.
- [18] J. M. Rafi, M. Zabala, O. Beldarrain et al., "Deposition temperature and thermal annealing effects on the electrical characteristics of atomic layer deposited Al₂O₃ films on silicon," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 158, no. 5, p. G108, 2011, doi: 10.1149/1.3559458.
- [19] A. Maréchal, M. Aoukar, C. Vallée et al., "Energy-band diagram configuration of Al₂O₃/oxygen-terminated p-diamond metal-oxide-semiconductor," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 107, no. 14, 2015, doi: 10.1063/1.4932946.
- [20] A. G. Burachenko et al., « Luminescence spectra of diamonds containing nitrogen-vacancy and interstitial photoactive centers », *Journal of Luminescence*, vol. 237, p. 118214, sept. 2021, doi: 10.1016/j.jlumin.2021.118214.
- [21] T. Teraji, Y. Garino, Y. Koide et al., "Low-leakage p-type diamond Schottky diodes prepared using vacuum ultraviolet light/ozone treatment," *J. Appl. Phys.*, vol. 105, no. 12, 2009, doi: 10.1063/1.3154554.
- [22] 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, juill. 2010, doi: 10.1016/j.diamond.2010.01.036.
- [23] Y. G. Chen, M. Ogura, et H. Okushi, « Temperature dependence on current–voltage characteristics of nickel/diamond Schottky diodes on high quality boron-doped homoepitaxial diamond film », *Applied Physics Letters*, vol. 82, n° 24, p. 4367–4369, juin 2003, doi: 10.1063/1.1583868.