



HAL
open science

Mécanismes de claquage de diodes bipolaires en SiC - Impact du milieu isolant en surface

Lumei Wei, Marie-Laure Locatelli, Bertrand Vergne, Pierre Bidan, Sorin Dinculescu, Sombel Diaham, Grégory Grosset, Lionel Dupuy, Dominique Tournier

► **To cite this version:**

Lumei Wei, Marie-Laure Locatelli, Bertrand Vergne, Pierre Bidan, Sorin Dinculescu, et al.. Mécanismes de claquage de diodes bipolaires en SiC - Impact du milieu isolant en surface. Symposium de Génie Electrique (SGE'16), Jun 2016, Grenoble, France. hal-01361631

HAL Id: hal-01361631

<https://hal.science/hal-01361631>

Submitted on 7 Sep 2016

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.

Mécanismes de claquage de diodes bipolaires en SiC - Impact du milieu isolant en surface

L. Wei^{1,2}, M.-L. Locatelli^{1,2}, B. Vergne³, P. Bidan^{1,2}, S. Dinculescu^{1,2}, S. Diahm^{1,2}, G. Grosset⁴, L. Dupuy⁴, D. Tournier⁵

¹Université de Toulouse; UPS ; INPT; LAPLACE (Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie);
118 route de Narbonne, F-31062 Toulouse cedex 9, France

²CNRS; LAPLACE; F-31062 Toulouse, France

³Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis, 5 rue du Général Cassagnou, 68300 Saint-Louis

⁴Ion Beam Services, Rue G. Imbert prolongée, Z.I. Peynier Rousset 13790 Peynier, France

⁵Université de Lyon, CNRS, Laboratoire Ampère, INSA-LYON, F-69622, France

RESUME— Une étude de diodes bipolaires en SiC-4H protégées par poche est présentée, afin d'analyser le rôle de l'environnement isolant sur les mécanismes de claquage. Pour les diodes épaisses protégées par poche fortement dopée, simulation et expérience sous vide montrent une tension de claquage V_{BR} améliorée par la présence d'un film de passivation secondaire en polyimide (PI), ainsi que leur très grande sensibilité aux charges additionnelles liées aux isolants. La localisation du lieu de claquage par une électroluminescence ponctuelle visible en bord de poche est manifeste d'un claquage réversible par ionisation par impact dans le SiC. Les tenues en tension des diodes épaisses avec passivation primaire en SiO₂ (sans PI) sont dépendantes du milieu ambiant, plus élevée sous azote à 1 atm que sous vide secondaire.

Mots-clés—carbure de silicium, polyimide, vide, azote, passivation, diode bipolaire, tension de claquage, champ de rupture

1. INTRODUCTION

Protéger la périphérie de la zone active est essentiel pour l'obtention d'un composant (CP) à semi-conducteur 'Haute Tension' [1]. Une attention particulière doit être portée au cas des semi-conducteurs à grand gap, qui possèdent un champ électrique critique E_C , environ dix fois supérieur à celui du silicium (Si), comme dans le cas du carbure de silicium (SiC). Cette spécificité entraîne l'existence de niveaux de champ électrique E nouveaux au sein des structures par rapport à l'existant. De plus, de tels E_C autorisent la conception de CPs supportant des tensions unitaires (par puce) jusque-là inégalées [2], et augmentent encore la contrainte électrique sur l'environnement isolant proche de la puce. Des architectures destinées à réduire les renforcements de champ, et des matériaux de passivation et d'encapsulation à forte rigidité diélectrique E_{BR} , doivent être recherchés, pour permettre à l'ensemble de fonctionner avec des performances maximales (états passant et bloqué).

Ce travail est focalisé sur la compréhension du comportement de diodes bipolaires $P^+N^-N^+$ en SiC-4H, au voisinage de leur tension de claquage V_{BR} , définie comme la tension pour laquelle le courant inverse dans la diode augmente brutalement de plusieurs décades (jusqu'à la limite de courant autorisée durant le test, et conduisant à une destruction ou non

du composant). Ces CPs sont protégés en périphérie par extension de la terminaison de jonction (Junction Termination Extension, JTE), et recouverts d'un film de dioxyde de silicium (SiO₂), surmonté d'un dépôt de polyimide (PI), et d'un milieu ambiant isolant. La protection par JTE, réalisée dans le semi-conducteur, consiste à entourer la jonction à protéger par une zone dopée (appelée aussi poche), de façon à étaler latéralement la zone de charge d'espace développée de part et d'autre des jonctions PN sous polarisation inverse. De nombreux travaux [3,4] ont montré l'efficacité de la protection par JTE pour les CPs en SiC, ainsi que sa sensibilité à la dose de dopant implantée dans la poche. L'effet de la couche de passivation secondaire en PI, et de la nature du milieu environnant sur les mécanismes en jeu au moment du claquage est en revanche peu analysé, et son étude est l'objectif de nos travaux. L'impact de la présence ou non du film PI sur la distribution du champ électrique E dans toute la structure, en fonction du dopage de la JTE, est d'abord étudié par simulation, pour deux épaisseurs de l'épitaxie N^- (10 μm et 40 μm). Ensuite, les résultats des tenues en tension expérimentales, mesurées à température ambiante sous vide, sont présentés, ainsi que les comportements observés au moment du claquage, pour les deux épaisseurs d'épitaxie considérées, et en présence ou non de la passivation par PI. Pour les diodes de plus haute tenue en tension (avec épitaxie épaisse), les résultats expérimentaux obtenus sous azote à la pression atmosphérique sont également décrits. L'ensemble de cette étude est ensuite discuté afin de proposer des hypothèses d'interprétation des phénomènes en jeu au voisinage du claquage, et d'en déduire certaines informations utiles pour la conception et la fabrication de futurs CPs haute tension en SiC.

2. CHOIX DES MATERIAUX ET REALISATION DES DIODES ETUDIÉES

Les composants ont été fabriqués par la société IBS à partir de plaquettes 4'' en SiC-4H, de type N^+ avec une épitaxie N^- , fournis par la société CREE Research (substrats de qualité U, i.e. avec une densité de micropores ultra-faible, $< 1 \text{ cm}^{-2}$). Le dopage de l'épitaxie N^- est identique pour toutes les plaquettes, égal à $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \pm 5\%$, et deux cas différents pour son épaisseur sont considérés ici: 10 μm et 40 μm ($\pm 1,5\%$). Comme le montrent les résultats de simulation présentés en

Fig.1, obtenus pour une structure P⁺N⁻N⁺ plane parallèle idéale, et donnant la tension de claquage en fonction du dopage de l'épitaxie N⁻, pour différentes épaisseurs, une large gamme de tenues en tension maximales théoriques est attendue pour ce dopage unique (1×10¹⁵ cm⁻³) en faisant varier l'épaisseur de 10 μm et 40 μm (respectivement de 1950 V à 6470 V). La tenue en tension sera également faiblement dépendante de l'incertitude sur le niveau de dopage pour les épaisseurs inférieures à 40 μm. De plus, faire l'étude à paramètre de dopage d'épitaxie constant permet de minimiser les variations de propriétés qui en dépendent, tels que les profils des jonctions P⁺N⁻ et PN⁻, et donc autoriser les analyses comparatives entre les différents cas.

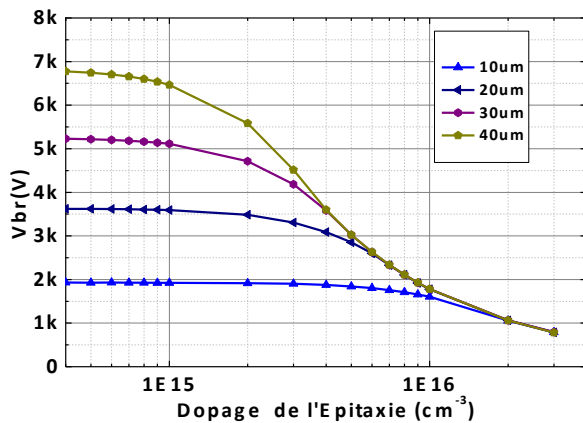


Fig. 1 Tenue en tension maximale théorique pour une structure P⁺N⁻N⁺ plane parallèle en fonction du dopage et de l'épaisseur de la couche N⁻ (dans les mêmes conditions de simulation par éléments finis qu'au paragraphe 3).

Des implantations ioniques d'aluminium multiples à chaud, ont été effectuées pour former successivement, à travers un masque d'oxyde, les zones d'émetteur et de JTE, suivies d'un recuit commun d'activation des dopants Al. Le dopage maximal dans la zone P⁺ est ainsi de l'ordre de 2 × 10¹⁹ cm⁻³ sur une profondeur de 0,3 μm. Pour cette étude, la dose de dopants implantée dans la JTE est égale à 1,24×10¹³ cm⁻² (selon une analyse par SIMS).

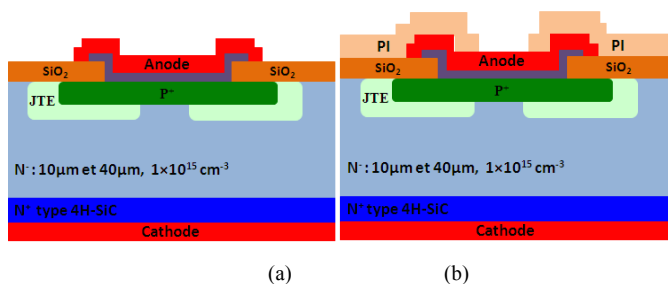


Fig.2 Schéma de la structure de la diode bipolaire: (a) sans PI, (b) avec PI.

La passivation primaire est réalisée en deux étapes: une oxydation thermique suivie d'un dépôt par PECVD, conduisant à un film de SiO₂ d'épaisseur proche de 1,5 μm. Après masquage et gravure de ce film isolant, la réalisation du contact ohmique sur les zones d'émetteur P⁺ est effectuée (dépôt, photolithographie et recuit du métal). Le contact ohmique en face arrière est également obtenu par dépôt et recuit d'un film métallique fin. Les électrodes d'anode et de cathode sont ensuite renforcées par un dépôt épais d'argent, conduisant à une épaisseur totale des électrodes proche de 2 μm. Chaque plaquette subit ensuite l'étape de dépôt du précurseur du polyimide de passivation secondaire, de masquage et de photolithographie de ce film permettant son retrait total sur une moitié de la surface de la plaque, et son retrait localisé au

centre des zones métallisées d'anode sur l'autre moitié. La dernière étape de fabrication correspond au recuit d'imidisation de la passivation secondaire, réalisée sous balayage d'azote. L'épaisseur finale du polyimide après recuit est égale à 13 μm. On obtient de cette façon simultanément sur une même plaquette des diodes avec et sans PI, sans découpe préalable. La Fig.2 représente les structures de diodes ainsi obtenues. Pour les composants considérés dans cette étude, la section des émetteurs P⁺ est de 0,926 mm² et la distance entre la périphérie de l'émetteur et la périphérie de la JTE est de 400 μm.

3. ETUDE DE L'INFLUENCE DES PARAMETRES EN SURFACE PAR SIMULATION ELECTRIQUE

La tenue en tension V_{BR} est déterminée par simulation numérique bi-dimensionnelle en utilisant le logiciel SENTAURUS [5]. Le logiciel permet de prendre en compte l'ensemble de la structure étudiée (SiC, électrode métal, isolants) pour calculer le champ E sous polarisation. La structure de la diode P⁺N⁻N⁺ simulée est présentée en Fig. 3, donnant ses principaux paramètres. Les profils verticaux des dopages d'émetteur et de JTE correspondent aux profils obtenus pour les dispositifs fabriqués (déterminés par analyse SIMS). Les permittivités relatives ε_r de SiO₂ et du polyimide sont 3,9 et 3,2 respectivement. Le milieu environnant (vide ou azote) est défini comme un matériau isolant de permittivité égale à 1. Outre les charges correspondant aux porteurs libres (électrons et trous) et aux dopants ionisés, des charges dans les isolants ou aux interfaces entre matériaux («charges additionnelles») peuvent être définies en entrée du simulateur.

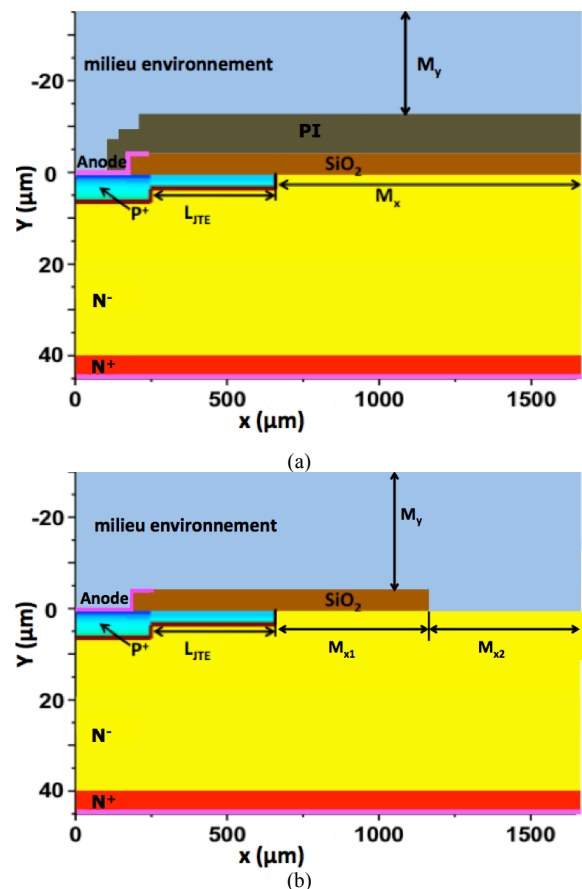


Fig. 3 Structure P⁺N⁻N⁺ en 4H-SiC simulée avec: épitaxie N⁻ (épaisseur=40 μm, dopage=10¹⁵ cm⁻³, émetteur P⁺ implanté (profondeur jonction=1,2 μm, dopage maximal=10¹⁹ cm⁻³, largeur=250 μm), poche 'JTE' P⁺ implantée (profondeur jonction=0,9 μm, dose=1,24 × 10¹³ cm⁻², L_{JTE}=400 μm), passivant SiO₂ (épaisseur=1,5 μm), passivant PI (a: épaisseur = 0 ou b: épaisseur = 13 μm), marge verticale air M_y = 250 μm. (a: marge latérale épitaxie M_x = 1000 μm, b: marge latérale épitaxie M_{x1} = 500 μm, M_{x2} = 500 μm).

Pour une polarisation donnée, les équations de continuité des courants sont résolues à chaque nœud de maillage dans SiC seul, et en tenant compte (le cas échéant) des porteurs générés par ionisation par impact dans le semi-conducteur. Les coefficients d'ionisation utilisés lors des simulations sont ceux publiés par A.O. Konstantinov et al. [6]. L'équation de Poisson est résolue quant à elle dans toute la structure. La tension pour laquelle apparaît le claquage par avalanche dans SiC, peut être déterminée par cette méthode (notée V_{BR-SiC}). En revanche, les mécanismes de rupture autres, tels que ceux pouvant intervenir dans les isolants, ne sont pas modélisés. Seules les distributions du potentiel et du champ électrique E pour une tension appliquée donnée peuvent être déterminées. Elles seront utiles à l'analyse a posteriori des comportements expérimentaux en vue de leur interprétation.

3.1. Influence de la présence de la couche passivation secondaire PI sur la tenue en tension V_{BR-SiC}

La Fig. 4 représente la tenue en tension en fonction de la dose de dopants implantée dans la JTE, pour les diodes avec PI et sans PI, ayant une épitaxie N⁻ d'épaisseur 10 μm et 40 μm . Aucune charge additionnelles liées aux isolants ne sont introduites ici. Pour ces structures avec épitaxie très faiblement dopée, la tension V_{BR-SiC} pour la structure mince de 10 μm , est très peu sensible à la dose de la JTE dans la gamme présentée ici, ainsi qu'à la présence ou non de PI. Mais pour les diodes épaisses, il existe une grande sensibilité de la tenue en tension en fonction de la dose de JTE, et un impact de la présence de PI sur V_{BR-SiC} : la structure avec PI permet d'augmenter la valeur de V_{BR-SiC} dans la gamme des fortes doses de JTE ($> 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$), par rapport à la structure sans PI. Les simulations montrent également (non présenté ici) que la zone où a lieu la génération du courant de claquage (zone d'ionisation par impact des atomes de SiC) se situe en bord de P⁺ quelle que soit la dose (cas 10 μm) ou pour les doses inférieures à la dose «optimale» pour laquelle V_{BR-SiC} est maximale (cas 40 μm), alors qu'elle se situe à l'extrémité de la poche pour les plus fortes doses (dans le cas avec épitaxie de 40 μm). Dans la suite de ce papier, nous nous focalisons sur la compréhension du comportement de diodes P⁺N⁻N⁺ en SiC-4H avec une forte dose dans la JTE (égale à $1,24 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$).

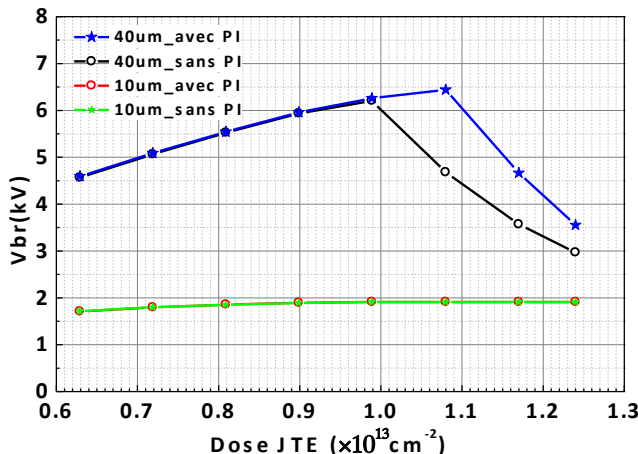


Fig.4 Tenu en tension de la structure P⁺N⁻N⁺ définie en Fig. 3(a) avec et sans polyimide PI, en fonction de la dose de implantée dans la JTE, pour deux épaisseurs d'épitaxie N⁻.

3.2. Influence de la présence de PI sur la répartition de champ en bord de JTE

Les Fig. 5 et Fig. 6 montrent les distributions latérales de la norme du champ électrique E pour différentes altitudes (Y) lorsque la tension appliquée correspond à V_{BR-SiC} . Dans le cas sans PI (Fig. 5), $V_{BR-SiC} = 2950 \text{ V}$. Dans le cas avec PI (Fig. 6),

$V_{BR-SiC} = 3560 \text{ V}$. Dans les deux cas, la courbe bleue correspond au profil latéral donnant la valeur la plus élevée de E dans SiC. Ce maximum (proche de 3 MV/cm) se situe à la courbure de jonction en bord de poche en dessous de la surface du SiC ($X = 650 \mu\text{m}$, $Y = 0,5 \mu\text{m}$). Cette zone correspond à la zone de génération du courant par avalanche.

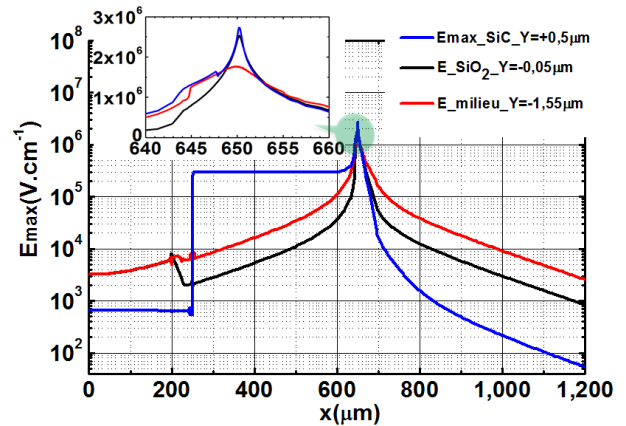


Fig. 5 Distributions latérales de E à différentes altitudes, sous polarisation égale à $V_{BR-SiC} = 2950 \text{ V}$ pour la diode sans PI.

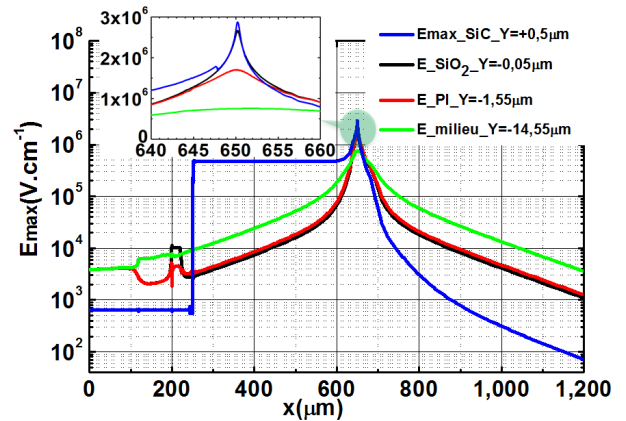


Fig. 6 Distributions latérales de E à différentes altitudes, sous polarisation égale à $V_{BR-SiC} = 3560 \text{ V}$ pour la diode avec PI.

Les Fig. 5 et Fig. 6 montrent aussi les profils du champ électrique au-dessus de SiC, dans SiO₂ ($Y = -0,05 \mu\text{m}$) et dans le milieu ambiant ($Y = -1,55 \mu\text{m}$). En présence de la couche de PI, les résultats conduisent aux mêmes allures, avec des champs dans les isolants plus faibles, ainsi qu'à une valeur plus élevée de $V_{BR-SiC} = 3560 \text{ V}$. Dans les deux cas, les maxima du champ E sous V_{BR-SiC} , en surface du semi-conducteur se situent au droit du bord de poche. Comparées aux valeurs de rigidité diélectrique E_{BR} connues pour ces milieux ($E_{BR-SiO2} > 8 \text{ MV/cm}$ [7], $E_{BR-PI} > 3 \text{ MV/cm}$ [8]), les valeurs simulées restent inférieures ou proches, sauf pour le milieu ambiant. En effet, pour l'azote à pression atmosphérique ($30 \text{ kV/cm} < E_{BR-N2} < 300 \text{ kV/cm}$ pour des distances inter-électrodes $> 10 \mu\text{m}$ [9]), on observe que la valeur de E estimée par simulation dépasse la valeur de la rigidité E_{BR-N2} sur plusieurs dizaines de μm .

Afin de comprendre l'impact du film de PI sur la tenue en tension, la Fig. 7 permet de comparer la répartition du champ électrique dans les deux structures avec PI et sans PI sous une même polarisation inverse, ici égale à 2500 V (pour exemple). On observe un resserrement moins important des équipotentielles au niveau du bord de poche ($X = 650 \mu\text{m}$) dans le matériau recouvrant le film de SiO₂ lorsque celui-ci a une permittivité peu différente de celle de SiO₂, comme c'est le cas pour PI. D'où un resserrement des équipotentielles également

moins important dans SiO₂ et dans SiC pour une même tension inverse appliquée.

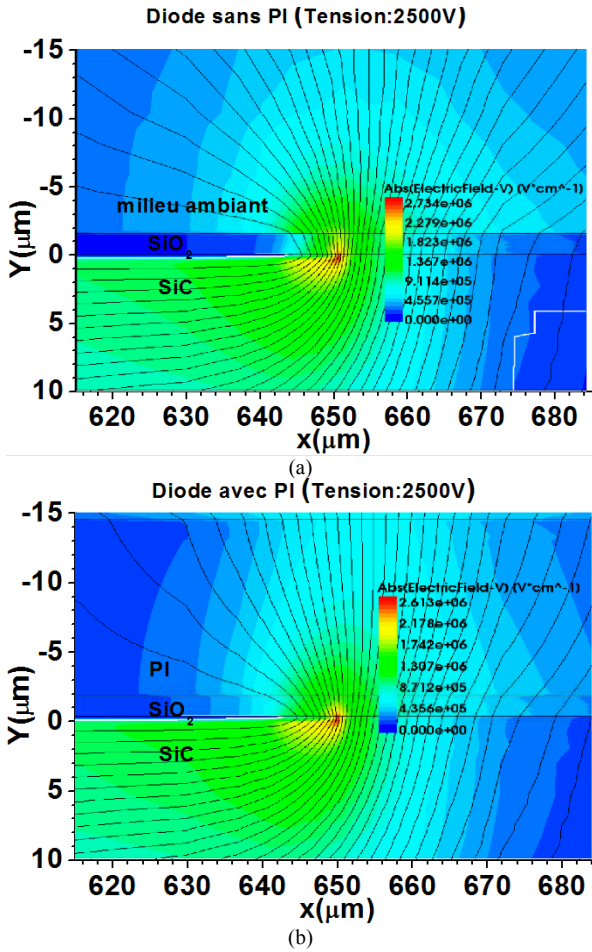


Fig. 7 Comparaison de la répartition du champ électrique et des équipotentielles dans les structures (a) sans PI et (b) avec PI, zoomées sur le semi-conducteur et la couche de SiO₂ en bord de poche, pour une tension inverse appliquée de 2500V (simulation sans charges additionnelles).

3.3. Influence de charges interfaciales additionnelles

Il est connu que des charges additionnelles à l'intérieur des isolants ou aux interfaces entre les différents milieux peuvent être présentes en pratique [10], et qu'elles modifient la répartition des potentiels et champs électriques dans le dispositif. Afin de quantifier leur impact pour nos structures, nous considérons ici le cas où des charges fixes seraient présentes à l'interface entre SiO₂ et la couche supérieure (milieu ambiant ou PI).

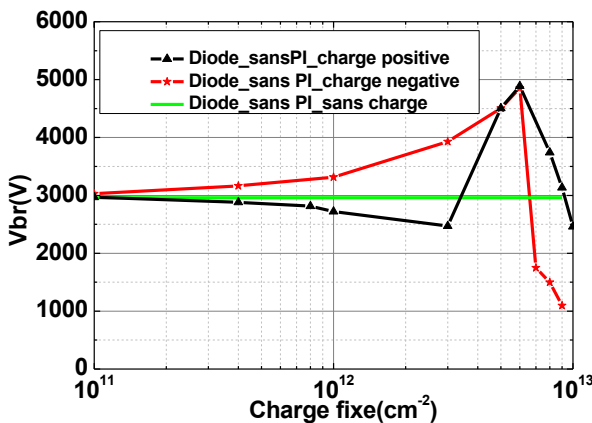


Fig. 8 Tenue en tension V_{BR-SiC} en fonction de la densité de charge fixes à l'interface SiO₂/milieu ambiant pour la diode sans PI. (Rappel: la dose de dopants dans la JTE est $1,24 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$).

La Fig. 8 présente l'effet de la densité surfacique de telles charges et de leur signe sur la tenue en tension simulée dans SiC, dans le cas d'une diode avec épitaxie de 40 μm sans PI. L'augmentation de la densité de charges négatives entraîne l'étalement de la zone de charge d'espace en bord de poche et en surface de l'épitaxie N⁻, d'où un relâchement de la contrainte en champ en bord de JTE (pour une tension appliquée donnée), et une augmentation importante de la tension nécessaire pour provoquer l'avalanche de porteurs en bord de poche dans SiC. Pour les densités de charges négatives plus élevées, supérieures à $-6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ (selon Fig. 8), la zone désertée développée dans le semi-conducteur sous la couche de SiO₂ devient profonde, et contraint les équipotentielles à contourner la couche de SiO₂, comme le montre la Fig. 9, provoquant le claquage dans SiC en périphérie de l'isolant pour une tension très faible.

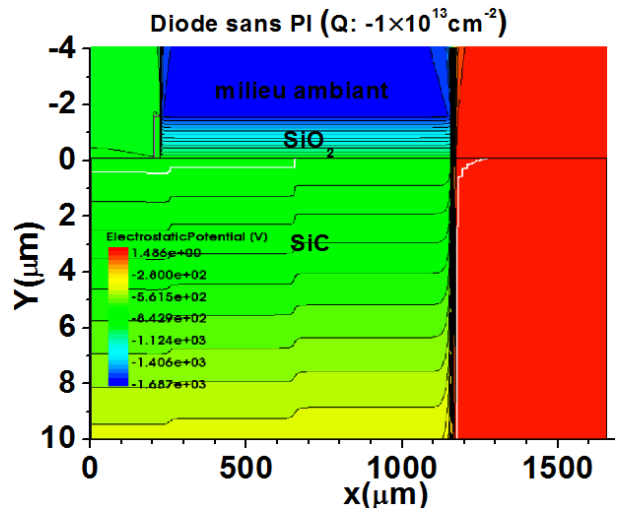


Fig. 9 Répartition des équipotentielles dans la diode sans PI, en présence d'une densité de charges fixes à l'interface SiO₂/milieu ambiant égale à -10^{13} cm^{-2} , pour la tension appliquée $V_{BR-SiC} = 953 \text{ V}$.

La Fig. 8 montre aussi que l'effet de charges de signe positif est également significatif. Il conduit quant à lui tout d'abord à une diminution de V_{BR-SiC} , pour les densités de charges positives faibles, du fait du resserrement des équipotentielles en bord de poche dans la zone N⁻.

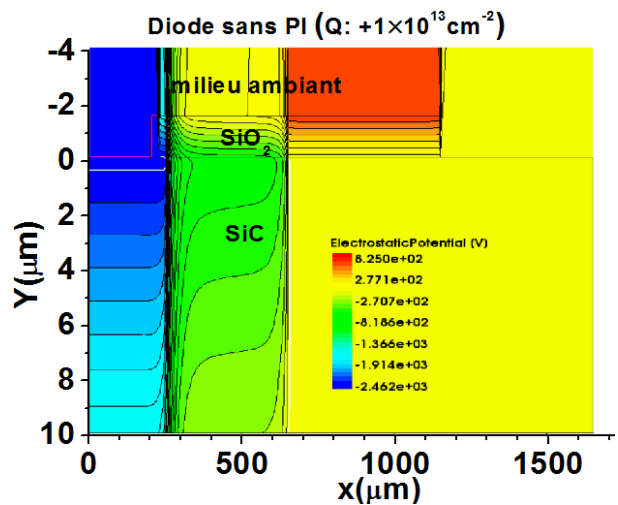


Fig. 10 Répartition des équipotentielles dans la diode sans PI, en présence d'une densité de charges fixes à l'interface SiO₂/milieu ambiant égale à $+10^{13} \text{ cm}^{-2}$, pour la tension appliquée $V_{BR-SiC} = 2438 \text{ V}$.

Pour les densités plus élevées (entre $+3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ et $+9 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$), du fait de la désertion de la poche P, une tension de claquage plus élevée qu'en l'absence de charges est

obtenue. Au-delà, pour une densité de charges $> 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, le pic du champ maximal dans SiC revient à la périphérie de l'émetteur entraînant l'avalanche de porteurs pour une tension de nouveau plus faible qu'en l'absence de charges (voir Fig. 10 pour une densité de charges positives égale à 10^{13} cm^{-2} à la tension de claquage de 2438 V). Les résultats obtenus dans le cas de la diode avec PI sont qualitativement identiques (non montrés ici). En revanche, les simulations dans le cas de structures avec épitaxie de $10 \mu\text{m}$ ont également été réalisées et ont montré que la présence de charges fixes dans la gamme de densités investiguées a très peu d'influence sur la tension de claquage du semi-conducteur.

4. ETUDE EXPERIMENTALE

Les mesures de tenue en tension des diodes ont été réalisées à l'aide du banc expérimental [11] de l'Institut franco-allemand de recherche de Saint Louis (ISL), qui a permis la mesure des caractéristiques inverses, à 20°C , sur les plaquettes de $4''$. Le courant de fuite I est mesuré en fonction de la tension appliquée V , laquelle est augmentée de façon automatique (rampe $dV/dt = 10 \text{ V/s}$) ou manuelle, jusqu'à la tension de claquage V_{BR} . Cette tension est la tension pour laquelle la limitation en courant fixée par l'opérateur est atteinte.

4.1. Diodes avec épitaxie de $10 \mu\text{m}$ testées sous vide

Une première série de mesures $I(V)$ sous vide (I limité à $2 \mu\text{A}$) en mode automatique une cinquantaine de diodes a montré un comportement très reproductible se manifestant par le claquage destructif des diodes pour des valeurs de tension appliquée comprises entre 1820 V et 1850 V (Fig. 11), quelle que soit la passivation (avec ou sans PI). La Fig. 12 représente les mesures de I en fonction de V en mode automatique (tension limitée à 1790 V pour ne pas détruire les diodes), pour un échantillon de 44 diodes sans PI et 36 diodes avec PI. On n'observe pas de différence du courant entre les diodes sans PI et avec PI dans la gamme des hautes tensions jusqu'à V_{BR} .

La Fig. 13 montre la photographie d'une diode après claquage, permettant d'observer la zone dégradée par la rupture, touchant la métallisation d'anode, pouvant résulter d'un claquage localisé en bord d'émetteur P^+ (à $30 \mu\text{m}$ du bord du métal), comme prévu par la simulation. Les valeurs de V_{BR} expérimentales sont 4% plus faibles que la valeur obtenue en simulation. Donc pour cette épitaxie de diode ($10 \mu\text{m}$), les paramètres de dose de JTE et de passivation secondaire n'influençant pas le résultat de V_{BR} , on peut considérer que les coefficients d'ionisation par impact utilisés dans notre simulation sont réalistes.

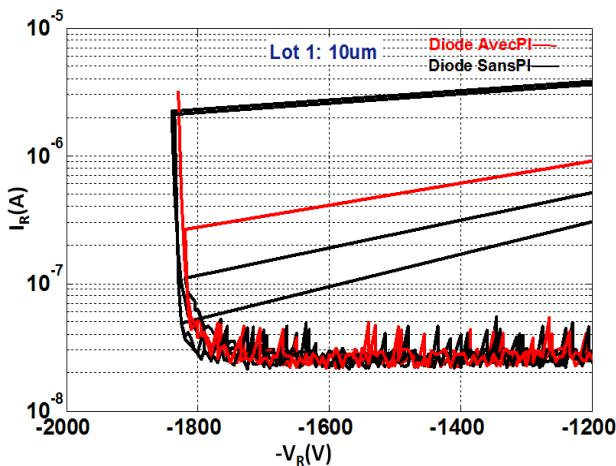


Fig. 11 Caractéristiques en inverse sous vide de diodes avec et sans PI d'épitaxie de $10 \mu\text{m}$ jusqu'à la tension de rupture.

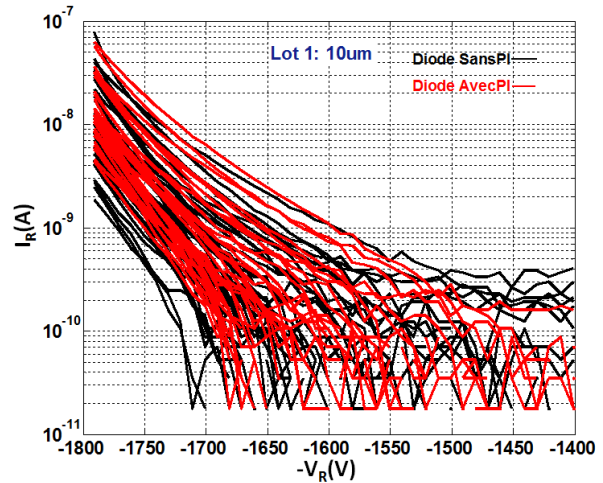


Fig. 12 Caractéristiques $I(V)$ en inverse sous vide de diodes avec et sans PI d'épitaxie de $10 \mu\text{m}$, tension limitée à 1790 V .

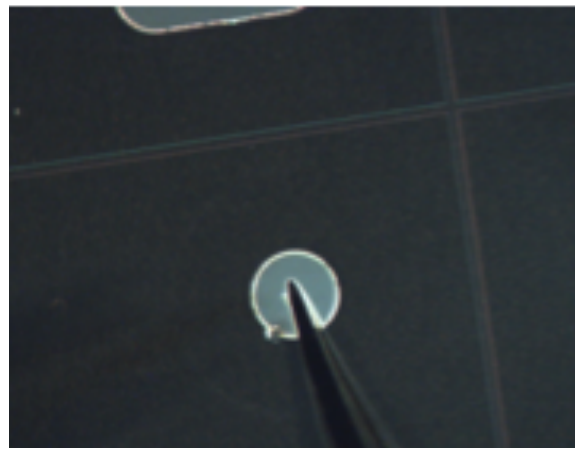


Fig. 13 Photographie d'une diode (épitaxie d'épaisseur $10 \mu\text{m}$) sans PI dégradée en bord d'émetteur après claquage sous vide à 1830 V .

4.2. Diodes avec épitaxie de $40 \mu\text{m}$ testées sous vide

Pour les diodes de $40 \mu\text{m}$ (issues d'un premier lot de fabrication), nous observons en Fig. 14(a), montrant les caractéristiques $I(V)$ obtenues en mode automatique, que les courants de fuite sont très faibles (densité de courant $< 20 \mu\text{A/cm}^2$) jusqu'à la tension V_{BR} . Dans ce cas, la tenue en tension maximale atteinte est de 2740 V pour les diodes avec PI (nombre : 60 diodes) et 1970 V pour les diodes sans PI (nombre: 32 diodes), de valeur moyenne avec et sans PI $V_{BR\text{-moy}} = 2240 \text{ V}$ et 1810 V respectivement, avec une dispersion plus grande en présence de PI (voir l'histogramme en Fig.14(b)). La tension $V_{BR\text{-exp}}$ est plus faible que les valeurs prévues par simulation ($V_{BR\text{-SiC}}$ valant 3551 V et 2956 V respectivement) sans charge.

Pour ces diodes (avec et sans PI), l'augmentation brutale de courant à V_{BR} n'entraîne pas la destruction des composants. Testées en mode manuel, en maintenant la tension inverse appliquée constante (et en limitant le courant à $10 \mu\text{A}$), on observe l'apparition d'un (ou plusieurs points lumineux) en périphérie de la diode, à une distance du bord de l'émetteur correspondant à la largeur de la JTE, comme présenté en Fig. 15. Ces points électroluminescents traduisent la présence d'une génération locale de porteurs par ionisation par impact dans le semi-conducteur [12,13], et témoignent donc de la présence d'un pic de champ suffisamment élevé pour produire cette avalanche. L'effet de la présence de PI sur l'augmentation de la tension nécessaire à l'obtention de ce niveau de champ (V_{BR} avec PI $> V_{BR}$ sans PI) est en accord avec la simulation.

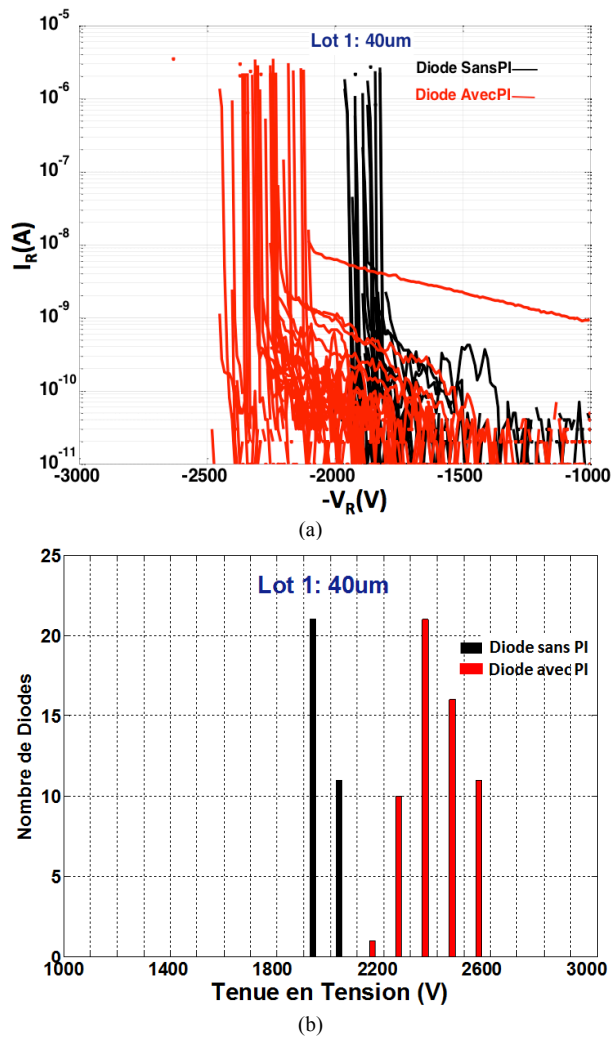


Fig. 14 Caractéristiques en inverse sous vide de diodes sur épitaxie de 40 μm issues du premier lot de fabrication : (a) I(V), (b) histogramme de V_{BR} .

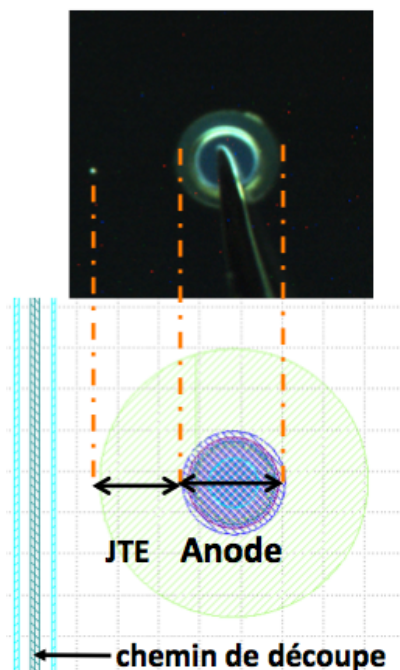


Fig. 15 Point électroluminescent observé pour une diode avec PI à $V=V_{BR}=2300$ V et $I=I_{lim}=10$ μA sous vide. (Diamètre de l'électrode = 460 μm , $L_{JTE}=400$ μm).

L'observation expérimentale d'un lieu de claquage dans SiC très localisé (avec ou sans PI) pourrait être lié à la présence d'une polarisation négative en surface de l'oxyde SiO_2 (présence de charges négatives ou film conducteur résiduel) entraînant un étalement des équipotentiels en bord de JTE, à l'exception du point luminescent. Nous privilégions cette hypothèse ayant pu observer, grâce à la technique OBIC (au laboratoire AMPERE), l'existence d'une zone de charge d'espace en surface de l'épitaxie de type N', au-delà de la zone implantée P (JTE) et en dehors des zones non recouvertes de SiO_2 (chemin de découpe), autour de la diode polarisée en inverse. Suite à cette observation, une modification du procédé technologique mis en œuvre pour la fabrication d'un deuxième lot de diodes a permis d'accroître les tensions maximales et moyennes atteintes expérimentalement, comme le montre l'histogramme présenté en Fig. 16. Pour ce deuxième lot, la tension maximale obtenue est de 4280 V pour les diodes testées avec PI (nombre: 32 diodes) et 3300V pour les diodes sans PI (nombre: 60 diodes), la valeur moyenne $V_{BR\text{-moy}}$ est de 3383 V et 2621 V respectivement avec et sans PI. Une plus large dispersion des résultats est cependant observée (avec des valeurs à la fois très supérieures ou inférieures à la valeur simulée sans charges). Cela révèle une grande inhomogénéité des densités de charges en surface liées aux isolants, auxquelles la tenue en tension est extrêmement sensible (comme vu par simulation, cf. Fig 8), et que leur maîtrise peut encore être améliorée.

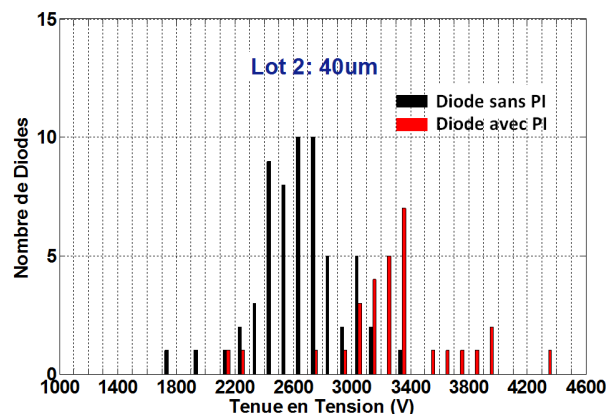


Fig. 16 Histogramme de la tenue en tension V_{BR} expérimentale sous vide de diodes avec épitaxie de 40 μm issues du deuxième lot de fabrication.

4.3. Diodes avec épitaxie de 40 μm testées sous $P_{a_{N_2}}=1$ bar

Quelques diodes issues du lot 1 de fabrication, ayant présenté des tenues en tension élevées sous vide ont également été testées à la pression atmosphérique (sous azote), afin d'observer l'effet de la présence de pics de champ d'amplitude élevée (révélés par électroluminescence du carbure de silicium) dans le milieu ambiant et l'influence de ce dernier sur la tenue en tension. La tension est appliquée manuellement (I limité à 10 μA). Le tableau 1 rassemble les valeurs de la tenue en tension de ces diodes selon la nature du milieu ambiant.

Tableau 1. Tenue en tension sur Lot 1 (40 μm) selon la nature du milieu ambiant

Nature du milieu ambiant	Tenue en tension (V)			
	Sans PI		Avec PI	
	Diode 1	Diode 2	Diode 3	Diode 4
Vide (5×10^{-6} mBar)	1932	2003	2375	2345
Azote (1atm)	3657	3209	2502	2604

Pour les diodes avec PI, on peut observer que les tenues en tension augmentent légèrement (de 5% à 11 % pour Diode 3 et Diode 4) sous azote par rapport aux valeurs obtenues sous vide. Par ailleurs, le comportement au moment du claquage sous azote est très comparable à celui sous vide, avec l'apparition d'un point lumineux en bord de JTE concomitant avec l'apparition d'un courant inverse élevé dans la diode (semblable au cas illustré en fig. 15). Ce résultat met en évidence que les valeurs élevées de pic de champ dans le milieu ambiant, évaluées par simulation de l'ordre de 600 kV/cm au-dessus du film de PI et dépassant les 30 kV/cm sur une distance de plus de 100 μm (voir figure 6(b)), ne sont pas critiques pour l'azote.

Les observations sont très différentes dans le cas des diodes sans PI. Le tableau 1 montre que leur tenue en tension est significativement plus grande sous N_2 (89 % et 60 % plus élevée pour Diode 1 et Diode 2). Par ailleurs, aucun point lumineux n'est observé lorsque la tension est augmentée, révélant que le renforcement local de champ au bord de JTE ne se produit plus, y compris pour des tensions jusqu'à plus de 3600 V. L'interaction entre les atomes d'azote excités et la surface de l'oxyde lorsque le champ électrique devient localement élevé peut être à l'origine de la création de charges négatives [14]. Ces charges viennent contribuer à l'étalement des équipotentielles en surface de la zone N^- (comme discuté au paragraphe 3.3), et donc combattre le renforcement de champ nécessaire pour ioniser les atomes de SiC. Le claquage se manifeste par un arc lumineux dans l'azote semblant se produire entre l'anode et une zone de SiC à nu, comme la photographie en Fig. 17 permet de l'observer pour la Diode 1 du Tableau 1. Pour cette valeur élevée de tension, le claquage a lieu cette fois-ci par contournement dans le milieu ambiant, avant qu'il n'y ait pu avoir avalanche dans le semi-conducteur. La nature différente de l'isolant de surface et les valeurs de champ électrique plus élevées pour une même tension inverse appliquée peuvent expliquer les comportements très différents observés entre les diodes avec PI en surface sous azote et avec SiO_2 en surface sous azote.

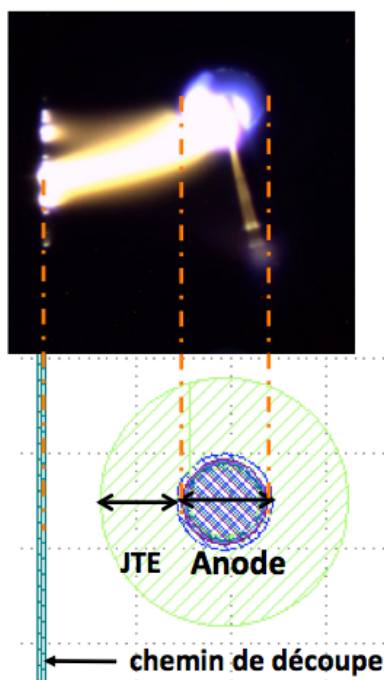


Fig. 17 Arc de claquage observé pour une diode sans PI testée sous N_2 à la pression atmosphérique pour une tension appliquée de 3657 V (Diamètre de du métal d'anode = 460 μm , L_{JTE} = 400 μm).

5. CONCLUSION

Des diodes bipolaires $\text{P}^+\text{N}^+\text{N}^+$ en SiC-4H protégées par JTE fortement dopée, de tenue en tension théorique allant de 2000 V (diodes minces avec épitaxie N^- d'épaisseur 10 μm) à 3500V (diodes épaisses avec épitaxie N^- de 40 μm) ont été étudiées par simulation et caractérisées expérimentalement afin de mieux comprendre le rôle des paramètres liés aux matériaux isolants et au milieu ambiant présents en surface. Les diodes minces ont présenté un comportement expérimental très homogène, qualitativement et quantitativement très proche des prévisions simulées, confirmant sa faible dépendance vis-à-vis des paramètres des matériaux en périphérie de jonction et en surface, et validant les choix des paramètres physiques influents du semi-conducteur. Les diodes épaisses ont montré leur très grande sensibilité aux propriétés des matériaux présents en surface, leur tenue en tension étant contrôlée par la répartition du champ électrique en bord de JTE. Sous vide, la présence du film de polyimide permet d'augmenter la tenue en tension de ces diodes à JTE fortement dopée, en présence ou non de charges (ou de polarisation) additionnelles en surface. Il permet une meilleure inertie à l'azote en présence de forts pics de champ. Par une meilleure connaissance des mécanismes en jeu, cette étude a permis une première amélioration de la tenue en tension moyenne expérimentale, effective sur le deuxième lot de fabrication étudié, et de dégager d'autres pistes d'augmentation de la tension de claquage et de son homogénéité pour les futurs composants haute tension visés.

6. REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement D. Planson et H. Hamad du laboratoire AMPERE pour les premières caractérisations OBIC effectuées et leur pertinence, ainsi qu'Olivier Eichwald du groupe PRHE du laboratoire LAPLACE pour son apport pour la compréhension des mécanismes de claquage dans l'azote. Nous remercions également la DGIS pour son soutien à ces travaux dans le cadre du projet FilSiC.

7. REFERENCES

- [1] B.J. Baliga, "Modern Power Devices", New York, 3rd ed., Wiley, 1987
- [2] H. Niwa, G. Feng, J. Suda and T. Kimoto, «Breakdown Characteristics of 12-20 kV-class 4H-SiC PiN Diodes with Improved 4H-SiC PiN Diodes with Improved Junction Termination Structures», Materials Science Forum vol 338-342, p. 1387-1390, 2012.
- [3] R. Pérez, D. Tournier, P. T. Amador, P. Godignon, N. Mestres, J. Millan, «Planar Edge Termination Design and Technology Considerations for 1.7-kV 4H-SiC PiN Diodes», IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 52, no. 10, 2005
- [4] H. Niwa, G. Feng Hiroki, J.Suda, T. Kimoto, «Breakdown characteristics of 12–20 kV-class 4H-SiC PiN diodes with improved junction termination structures», 24th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics, p. 381-384, 2012.
- [5] Sentaurus, «An advanced multidimensional (1D/2D/3D) device simulator User's manual», 2012
- [6] A. O. Konstantinov, Q. Wahab, N. Nordell, and U. Lindelfelt. «Ionization rates and critical fields in 4H silicon carbide». Applied Physics Letters, 71(1) :90–92, 1997.
- [7] L. Wei, M. L. Locatelli, S. Diahm, C. D. Pham, G. Grosset, L. Dupuy, «Dielectric properties of SiO_2 film deposited by PECVD TEOS at high temperature», conférence SGE, Cachan, 8-10 juillet 2014.
- [8] S. Diahm, S. Zemat, M. L. Locatelli, S. Dinculescu, M. Decup and T. Lebey, «Dielectric breakdown of polyimide films: Area, thickness and temperature dependence», IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 17, No. 1; February 2010.
- [9] R. Papular, «Phénomènes Electriques dans les Gaz», Dunod, Paris, 1963
- [10] M. Noborio, J. Suda, and T. Kimoto, «P-channel MOSFETs on 4H-SiC {0001} and nonbasal faces fabricated by oxide deposition and N_2O annealing», IEEE Trans. Electron Devices, vol. 56, no. 9, pp. 1953-1958, 2009.

- [11] B. Vergne, G. Pâques, C. Maurer, S. Scharholz, P. Brosselard, D. Tournier, «PASChAC, système automatisé de caractérisation de composants sur wafer», EPF2012.
- [12] R. Ghandi, B. Buono, M. Domeij, R. Esteve, A. Schöner, J. Han, «Surface-passivation effects on the performance of 4H-SiC BJTs», IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 58, pp 259-265, 2011.
- [13] P.G. Muzykov, A.V. Bolotnikov, T.S. Sudarshan, «Study of leakage current and breakdown issues in 4H-SiC unterminated Schottky diodes» Solid-State Electronics, vol. 53, pp14-17, 2009.
- [14] E. Giamello, M. Cristina, M. Chiesa, D. M. Murphy, G. Pacchioni, R. Soave «N₂⁻ Radical Anion Reversibly Formed at the Surface of "Electron-Rich" Alkaline-Earth Oxide», J. Phys. Chem. B, Vol. 104, pp1887-1890, 2000.