

CHAPITRE V :

Jonctions p/n et dispositifs en diamant

Aboutissement des travaux développés aux chapitres précédents, ce chapitre mettra en avant les caractéristiques de plusieurs diodes p/n en diamant {111}. Ces dispositifs électroniques sont les résultats de la formation de deux empilements de couches n sur p, l'un réalisé au LEPES en 2003 par le Dr. Antonella Tajani sur un substrat Ib {111} fortement dopé au bore de type p⁺, l'autre réalisée lors des travaux de thèse au NIMS sur substrat de diamant Ib {111} non dopé prétraité RIE à l'oxygène. La composition, l'élaboration, les caractéristiques et les propriétés cristallines, électriques ou optiques de plusieurs diodes p/n seront présentées, comparées puis discutées.

1. Introduction

La jonction p/n est à la base de la fabrication des composants électroniques bipolaires qui ont longtemps dominé le monde de la microélectronique. Notre travail sur les diodes p/n en diamant qui ont été réalisées lors de la thèse, n'a pas la prétention de vouloir remplacer le silicium dans ses applications diverses et variées à la microélectronique. Cependant les nombreuses propriétés électroniques, optiques ou encore chimiques qu'offrent le diamant nous laissent croire à son avenir prometteur pour des applications dans des environnements critiques.

Le terme de « jonction » prend toute son importance quant au sujet de thèse car il définit bien un seul et même réseau cristallin, en l'occurrence celui du diamant, dans lequel on passe d'une région riche en donneurs, une couche de type n, à une autre région riche en accepteurs, une couche de type p ; dopages qui ont été largement discutés dans les chapitres III et IV précédents.

Peu de travaux sur les jonctions p/n en diamant *CVD* ont été menés avec succès jusqu'à aujourd'hui. Les premiers remontent aux années 90 et ont été amorcés par Okano et al. [Okano91a] [Okano91b] [Okano91c]. En 2001, sont publiés les tous premiers résultats sur des dispositifs en diamant monocristallin orienté {111} [Koizumi01]. Cette réelle avancée technologique est en fait une résultante du succès du dopage du diamant {111} de type n révélé par Koizumi et al. en 1997 [Koizumi97].

Aujourd'hui, l'évolution des dispositifs électroniques accompagne les progrès du dopage du diamant selon la qualité des couches monocristallines. Grâce au récent succès du dopage du diamant de type n selon {100} par Kato et al. [Kato05], il a également été possible d'élaborer des diodes p/n selon cette orientation [Makino05].

L'élaboration des dispositifs élémentaires en diamant qui seront ici présentés a notamment permis de mettre en avant les caractéristiques de chacune des couches de diamant dopées de type n et p avec lesquels ils sont formés. Avant d'exposer ces résultats, il est important de préciser le principe de leur fonctionnement. La première interprétation de la caractéristique courant-tension d'une diode p/n a été proposée en 1949 par Shockley et al. dans les laboratoires de la société *Bell* aux Etats-Unis.

2. La jonction p/n : description phénoménologique

a- La jonction non polarisée

Le schéma d'une diode p/n et son principe de fonctionnement sont tout d'abord donnés sur la figure V-1.

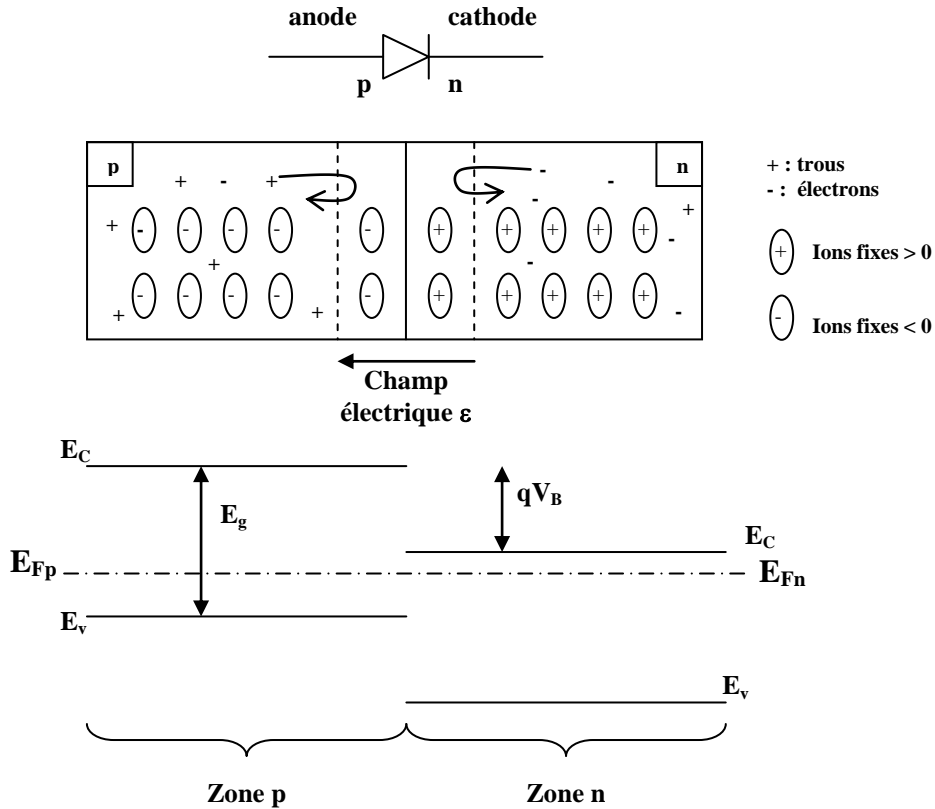


Figure V- 1 Processus de diffusion de porteurs dans une jonction p/n et alignement des niveaux de Fermi juste avant le contact des deux zones

A l'intérieur du dispositif, au contact des deux zones n et p, à l'équilibre thermodynamique, les niveaux de Fermi s'alignent, il apparaît alors une distorsion des bandes d'énergie qui se traduit par l'apparition d'une barrière de potentiel notée qV_B telle que :

$$qV_B = E_g - kT \log \left(\frac{N_C N_V}{N_A N_D} \right)$$

$$\text{Avec } N_C = \frac{2}{h^3} (2\pi m_e kT)^{3/2} = 2,5 \times 10^{19} \left(\frac{m_e}{m_0}\right)^{3/2} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2} \text{ et}$$

$$N_V = \frac{2}{h^3} (2\pi m_h kT)^{3/2} = 2,5 \times 10^{19} \left(\frac{m_h}{m_0}\right)^{3/2} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2} \text{ les densités équivalentes d'états d'énergie}$$

dans les bandes de conduction et de Valence.

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s. (constante de Planck)}$$

$$k = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1} = 8,616 \times 10^{-5} \text{ eV.K}^{-1} \text{ (constante de Boltzmann)}$$

$$\frac{kT}{q} = 25,9 \times 10^{-3} \text{ V}$$

Dans le cas du diamant, il est possible de calculer les valeurs N_V et N_C reliées aux masses effectives des électrons et des trous définies par Gheeraert et al. [Gheeraert00]. On obtiendrait alors :

$$N_V \cong 1,6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} \text{ et } N_C \cong 7,8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3} \text{ avec } m_e = 0,46 m_0 \text{ et } m_h = 0,74 m_0$$

$$(m_0 = 9,108 \times 10^{-31} \text{ kg})$$

Et : V_B (300K) $\cong 5,42 \text{ V}$ en considérant les concentrations de porteurs $N_A = N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (non loin de nos valeurs expérimentales) considérées ionisées à température ambiante pour un calcul simplifié.

En remplaçant $N_C N_V$ par $N_C N_V = n_i^2 \exp\left(\frac{E_g}{kT}\right)$, une nouvelle expression de la barrière de potentiel ou potentiel de diffusion est définie par :

$$V_B = \frac{kT}{q} \log\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

A dopage N_A, N_D identiques, plus le gap est grand (cas du diamant à large bande interdite), plus la hauteur de barrière est grande.

Du point de vue des espèces en présence, en l'absence de courant :

- les trous du matériau de type p voient une zone n où ils sont en minorité, ils diffusent vers cette zone n où ils se recombinent avec les électrons, ils laissent derrière eux les atomes ionisés négativement
- les électrons du matériau de type n voient une zone p où ils sont en minorité, ils diffusent vers cette zone p où ils se recombinent avec les trous, ils laissent derrière eux les atomes ionisés positivement

Ces charges fixes créent un champ électrique dans la zone de charge d'espace (ZCE) alors dépourvue de porteurs majoritaires et qui s'oppose à la poursuite du mouvement de diffusion,

un équilibre s'établit. La longueur de cette zone de charge d'espace varie en $V_B^{1/2}$. Lorsque la température augmente, V_B diminue donc la longueur de ZCE diminue également.

Des deux côtés de la ZCE, les densités de porteurs minoritaires sont donnés par :

$$n_p = n_n \exp\left(-\frac{qV_B}{kT}\right) \text{ du côté n et } p_n = p_p \exp\left(-\frac{qV_B}{kT}\right) \text{ du côté p}$$

Ces densités de minoritaires étant proportionnelles à l'inverse de l'exponentielle de V_B , il est possible de les faire varier fortement en modifiant la valeur de V_B , cas d'une jonction polarisée.

b- La jonction polarisée

Nous ferons ici l'approximation d'une jonction « épaisse » c'est-à-dire que les contacts extérieurs à la jonction sont situés à des distances supérieures aux longueurs de diffusion des porteurs minoritaires.

La polarisation de la jonction se fait par une tension extérieure V_j telle que la hauteur de la barrière de potentiel soit diminuée (cas de la polarisation en direct*) : $V_B' = V_B - V_j$

L'application d'une tension directe sur la jonction fait apparaître un courant direct de trous qui diffusent de la zone p vers la zone n et d'électrons qui diffusent de n vers p. Il est

proportionnel à $I_s \left[\exp\left(\frac{eV}{\alpha kT}\right) - 1 \right]$ avec α le coefficient d'idéalité et

$$I_s = S q n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right)$$

D_p est le coefficient de diffusion des charges positives du côté n

D_n est le coefficient de diffusion des charges négatives du côté p

$L_p = (D_p \theta_p)^{1/2}$ est la longueur de diffusion des charges positives du côté n et θ_p la durée de vie des charges positives du côté n

$L_n = (D_n \theta_n)^{1/2}$ est la longueur de diffusion des charges négatives du côté p et θ_n la durée de vie des charges négatives du côté p

En polarisation inverse**, la hauteur de la barrière de potentiel V_B est augmentée. Le courant inverse est théoriquement égal (en valeur absolue) au courant de saturation I_s précédemment décrit. En pratique, des courants de fuite passant par l'extérieur de la jonction et des courants

* le « + » du générateur sur la zone p

** le « - » du générateur sur la zone p

de génération-recombinaison à l'intérieur de la ZCE peuvent augmenter la valeur théorique idéale de I_s . Cet état correspond typiquement à l'un des problèmes que nous avons rencontré sur les diodes que nous allons maintenant associer à ce fonctionnement théorique.

Deux jonctions distinctes ont été homoépitaxiées sur un substrat de diamant Ib orienté {111} fortement dopé de type p^+ au bore pour l'une et sur un substrat de diamant Ib également orienté {111} non dopé pour l'autre. Les résultats de la première jonction correspondants aux travaux de thèse du Dr. A. Tajani en 2003 ont été publiés en 2004 et 2005 [Tajani04], [Tavares05].

Dans ce chapitre, nous développerons le processus de fabrication de chacune de ces jonctions p/n et la fabrication des diodes correspondantes ainsi que les caractéristiques de plusieurs d'entre elles mesurées pour la plupart au LEPES et au LEPMI.

3. Jonction p/n et diodes associées sur substrat fortement dopé bore

a- Conditions de croissance de l'empilement

Cette jonction p/n provient de la superposition de couches de diamant {111} MPCVD réalisées dans les réacteurs de croissance du LEPES. Sur le substrat de diamant {111} dopé bore sont déposées une première couche dopée de type p au bore, une seconde dopée de type n au phosphore et une dernière très fine fortement dopée phosphore nécessaire à la future formation du contact ohmique. La figure V-2 donne un schéma descriptif de l'empilement des couches p et n.

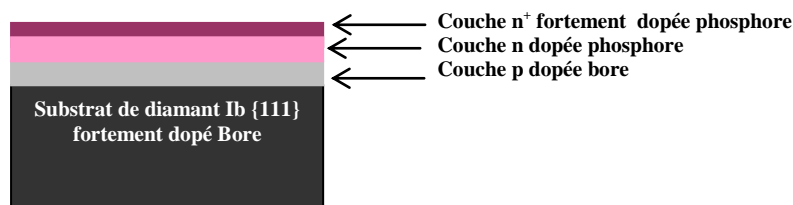


Figure V- 2 Représentation schématique de la jonction p/n en diamant {111} réalisée sur substrat Ib fortement dopé bore

Les conditions de croissance des deux couches sont similaires à celles décrites aux chapitres III et IV :

- 0,15 % de méthane, rapport [B]/[C] en phase gazeuse de 0,2 ppm pour la couche dopée de type p au bore

et

- 0,15 % de méthane, un rapport [P]/[C] en phase gazeuse de 650 ppm pour la couche dopée de type n et 7500 ppm pour celle de type n⁺.

Une mesure SIMS définissant les profils de bore et phosphore le long de la jonction est donnée sur la figure V-3. Les concentrations de dopants ainsi déterminées dans les couches supposées de type n⁺ / n⁻ / p / substrat p⁺ sont respectivement de $\sim 2 \times 10^{17}$ / $\sim 5 \times 10^{16}$ / $\sim 2 \times 10^{17}$ / 8×10^{19} at/cm³. L'épaisseur totale de la jonction est proche de 1 μm avec 0,85 μm de zone n et une épaisseur de zone p autour de 500 μm essentiellement déterminée par l'épaisseur du substrat.

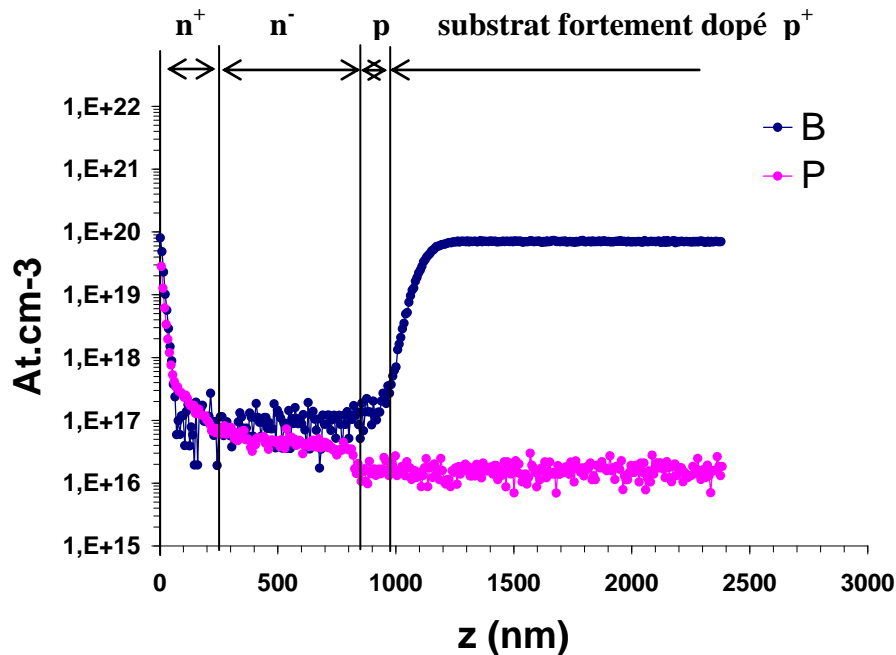


Figure V- 3 Profils SIMS de la jonction p/n en diamant {111} réalisée au LEPES sur substrat fortement dopé bore

b- Réalisation des diodes p/n

Chacune des 36 diodes de 150 μm de diamètre réalisées sur cette jonction p/n se différencie par un contact métallique composé de ~ 50 nm d'or sur ~ 20 nm d'aluminium sur ~ 40 nm de titane. Chaque plot métallique forme un contact ohmique entre le métal et le semi-conducteur

de type n (procédé mis au point par Teraji et al, déjà vu au chapitre II). La création de contacts métalliques nécessaires à la fabrication de composants électroniques a aussi été étudiée en 1999 par Teraji et al [Teraji99] et par Werner en 2003 [Werner03]. Dans tous les cas, le titane déposé à 400°C assure une bonne adhésion, l'aluminium prévient l'interdiffusion et l'or est utilisé pour la prise de contact. Un contact ohmique est principalement défini par un courant circulant dans les deux sens. Sur un semi-conducteur de type n, il est caractérisé par un travail de sortie du métal inférieur à celui du semi-conducteur n. Les électrons en passant du métal au semi-conducteur font apparaître une courbure de bande vers le bas (déficit de porteurs négatifs côté métal, accumulation côté semi-conducteur n). Un contact ohmique sur un semi-conducteur de type p est défini par un travail de sortie du métal supérieur à celui du semi-conducteur p. Les électrons passent du semi-conducteur au métal et font apparaître une courbure de bande vers le haut (accumulation de trous côté semi-conducteur p). La figure V-4 montre une photo de l'échantillon terminé après évaporation des contacts ohmiques.

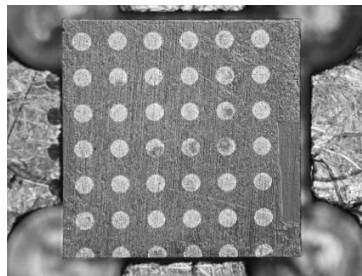


Figure V- 4 Photo de la jonction p/n réalisée sur substrat Ib {111} fortement dopé bore après évaporation des contacts ohmiques

Après avoir caractérisé chaque diode sous son contact métallique, nous avons réalisé des dispositifs selon des structures « mesa* », schématisée sur la figure V-5. Cette fabrication, par gravure ECR ayant totalement altéré les performances des diodes, nous ne présenterons que les résultats de caractéristiques obtenus au préalable de cette préparation.

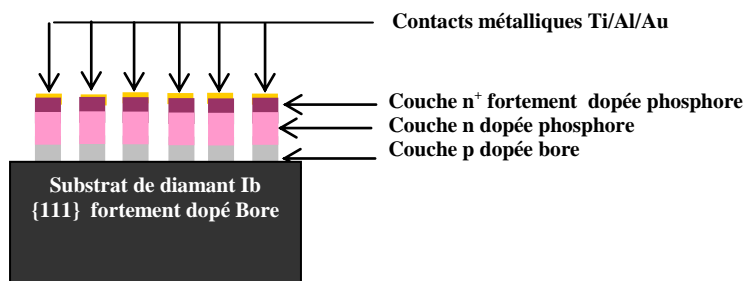


Figure V- 5 Schéma de diodes p/n en structure mesa, vue en coupe

* Le terme mesa est d'origine espagnole, il décrit ici des microstructures planes saillantes délimitées par des parois verticales.

Les structures mesa sont obtenues par gravure de la partie non protégée par les plots métalliques. Les conditions de gravure *ECR* pour la formation de ces structures sont données pour un mélange gazeux $\text{CF}_4/\text{O}_2 = 1 \%$, une tension d'auto-polarisation de -30V et une profondeur de gravure de $\sim 2 \mu\text{m}$, c'est-à-dire jusqu'au substrat obtenue au bout d'une heure. La figure V-6 montre des images *MEB* d'une diode isolée en structure mesa après la gravure.

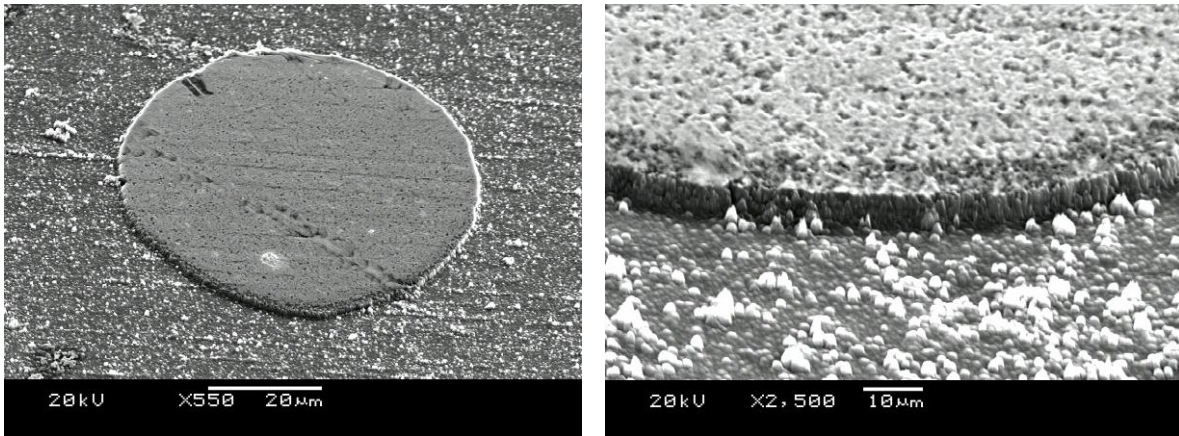


Figure V- 6 Images MEB d'une diode p/n en diamant sur le substrat Ib {111} fortement dopé bore

Nous observons de façon évidente les nombreux défauts de surface engendrés par la gravure que l'on associe au phénomène de « micromasking » créée par un re-dépôt de métal sur la surface pendant la gravure. La présence de tels défauts est très néfaste à la qualité des diodes car ils augmentent les courants de fuite.

La prise de contact proprement dite nécessaire à la caractérisation des diodes est réalisée « à la main » avec une goutte de laque d'argent sur plusieurs plots métalliques et un fil d'or, comme montré figure V-7.

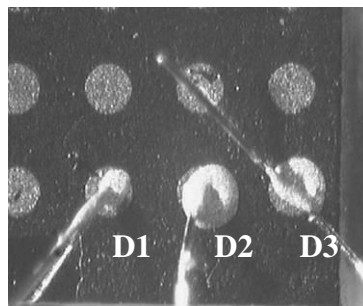


Figure V- 7 Image de la prise de contact (pâte d'argent et fil d'or) sur trois diodes p/n sur substrat fortement dopé bore

Cette étape « manuelle » est extrêmement critique et les caractéristiques électriques peuvent en dépendre fortement.

c- Caractérisations

c-1 Caractéristiques I(V)

Des mesures I(V) à température ambiante ont été réalisées sur les trois diodes D1, D2 et D3 précédemment décrites.

La source de tension est délivrée par un appareil source/mesure de type *Keithley 236* qui peut fonctionner soit en source tension (de +/- 100 μ V à +/- 110 V) et mesure courant (de +/- 10 fA à +/- 100 mA) en « compliance » de courant maximale 100 mA, soit en source courant (de +/- 100 fA à +/- 100mA) et mesure tension (de +/- 10 μ V à +/- 110 V) en « compliance » de tension maximale 110 V.

Pour une polarisation de la diode en directe, la tension positive est appliquée sur le contact ohmique de la couche dopée n et la masse est reliée à la face arrière du substrat de type p⁺.

Des courbes I(V) différentes ont été obtenues pour les trois diodes D1, D2 et D3. En particulier, le comportement de la diode D2 était totalement résistif notamment à cause du débordement de la laque d'argent autour du plot. Le courant ne passait alors non pas au travers de la diode mais par le contact extérieur débordant. Nous avons en revanche mesuré de « bonnes » caractéristiques pour les diodes D1 et D3. Celle de D1 présentant un redressement plus abrupt, nous ne discuterons que des résultats obtenus sur celle-ci ; sa caractéristique I(V) complète (courant direct et inverse) est donnée sur la figure V-8 sur laquelle le caractère redresseur de $\sim 10^5$ à +/-25 V de cette diode p/n en diamant est clairement mis en évidence. Nous pouvons cependant noter une valeur tension de seuil de 9V anormalement élevée due à la présence de charges piégées qui créent alors un champ électrique local décalant la tension de seuil et un courant de fuite trop important, modélisable par une résistance parallèle.

D'autres diodes ont été mesurées à différents endroits de l'échantillon ; des coefficients de redressement plus ou moins importants ont été obtenus en fonction des résistances de fuites, de contact ou de défauts de surface. Une des meilleures caractéristiques est donnée sur la figure V-9 révélant un coefficient de redressement de $\sim 10^{10}$ à +/- 30V ! Les valeurs de résistances parallèle et série sont respectivement estimées pour cette diode à $10^{14} \Omega$ et 4 K Ω . La résistance série est en fait la somme de plusieurs résistances limitant fortement les performances de la diode telles que les résistances de contact, de couches n et p, du substrat, du contact arrière. Elle devrait être la plus petite possible et pourrait par exemple être diminuée par une optimisation de la prise du contact ou du contact ohmique lui-même. La résistance parallèle qui permet les courants de fuite doit être la plus grande possible. Dans

notre cas, sa valeur est tout à fait acceptable. Elle a été fortement réduite à $\sim 10^7 \Omega$ par la gravure ECR utilisée lors la formation des structures mesa, contrairement au but recherché.

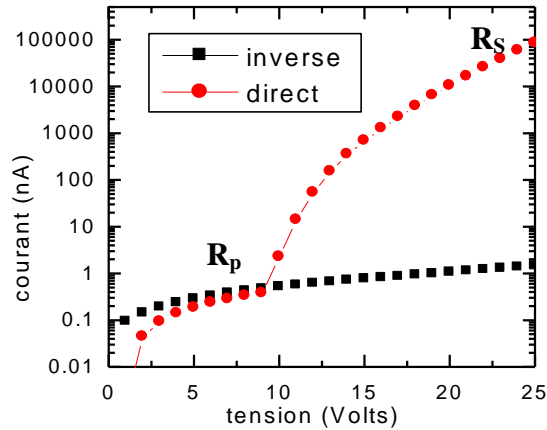


Figure V- 8 Caractéristique I(V) de D1 à température ambiante

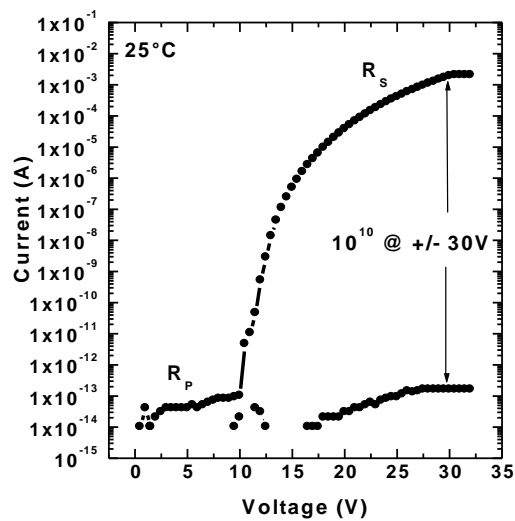


Figure V- 9 Meilleure courbe I(V) à température ambiante mesurée sur une diode p/n en diamant {111} homoépitaxiée sur substrat fortement dopé bore

Le coefficient d'idéalité calculé pour cette diode est autour de 11, très loin de la valeur idéale de 1 ! Afin de mettre en évidence les défauts qui pourraient limiter l'idéalité des ces diodes, des mesures de cathodoluminescence ont été réalisées directement sur la jonction p/n.

c-2 Cathodoluminescence

Le spectre de cathodoluminescence à 5K présenté sur la figure V-10 correspond à celui de la jonction p/n homoépitaxiée sur ce substrat fortement dopé bore. La tension d'accélération des électrons 20 kV permet une profondeur de pénétration du faisceau électronique supérieure à l'épaisseur de la jonction.

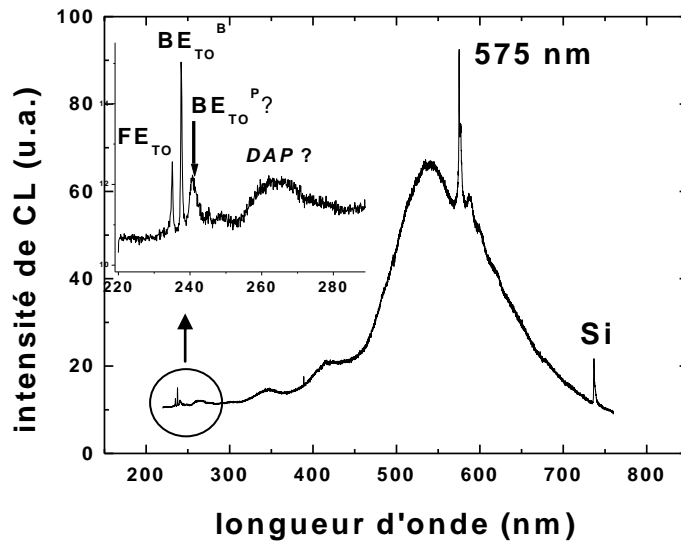


Figure V- 10 Spectre de cathodoluminescence de la jonction p/n en diamant sur substrat fortement dopé bore orienté {111}

Dans la zone excitonique, nous distinguons les pics particuliers :

- FE_{TO} à ~ 235.3 nm (5.268 eV)
- BE_{TO}^B à ~ 237.8 nm (5.215 eV)
- le pic à ~ 240.5 nm (~ 5.15 eV) pourrait être attribué à BE_{TO}^P ce qui signifierait alors que la couche dopée n serait en tension [Tajani03] [Mermoux04a] [Mermoux04b].
- la bande luminescente entre ~ 250 nm et ~ 275 nm (entre ~ 5 eV et 4.5 eV) a été mise en évidence par Sauer et al. qui ont relié l'origine de ce centre luminescence à des paires donneurs-accepteurs (DAP) également décrites par Sternschulte et al. [Sternschulte99a] [Sternschulte99b]. Ce type de recombinaison radiative met en évidence la présence d'impuretés de type accepteur dans la zone de type n.

Sur le spectre plus large, nous retrouvons une large bande entre ~ 500 nm et ~ 650 nm avec le pic à 575 nm révélateur de défauts d'azote (centre T1) dont nous avons déjà parlé et encore

largement décrite par Kanda et al. [Kanda01]. Il faut aussi noter la présence d'un pic à ~737 nm qui correspond à la présence non intentionnelle de silicium.

Ces nombreux défauts révélés par la mesure par cathodoluminescence pourraient expliquer les performances limitées de ces diodes. De plus, nous ne connaissons pas les qualités cristallines et électriques du substrat fortement dopé bore qui peuvent affecter directement les performances de la jonction p/n. L'électroluminescence mesurée a elle aussi confirmé la présence des défauts luminescents liés à la présence d'azote dans la jonction.

c-3 Electroluminescence

Le spectre d'électroluminescence (en noir) comparé à celui de cathodoluminescence (en gris) sur la figure V-11 correspond à celui obtenu sur une diode polarisée à 28V traversée par un courant de ~1 mA. Une photo de la lumière émise par la diode autour du contact dans ces conditions de polarisation est également rapportée sur la figure.

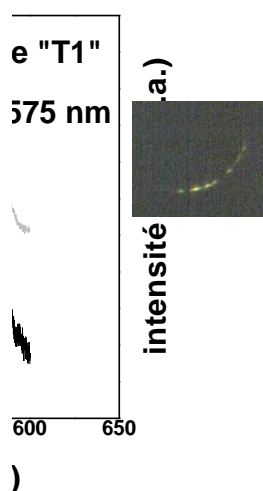


Figure V- 11 Electroluminescence (en noir) et cathodoluminescence (en gris) d'une diode p/n en diamant {111} réalisée sur substrat fortement dopé bore émettrice de lumière visible

Ce spectre a été collecté grâce au système du micro Raman du *LEPES*. La présence de défauts (dislocations, lacunes...) et d'impuretés telle que l'azote est ainsi confirmée par la bande d'électroluminescence dans le vert à partir de ~420 nm jusqu'à ~600 nm. On retrouve en particulier la luminescence à 575 nm par les défauts d'azote.

Une dernière caractérisation de diode a été réalisée par la mesure de courant induit par faisceau d'électrons (« Electron Beam Induced Current » (*EBIC*)). Nous allons ici simplement introduire la méthode et nous discuterons davantage des résultats sur les dispositifs obtenus à partir de la seconde jonction p/n réalisée sur substrat Ib non dopé.

c-4 Courant induit par faisceau électronique (*EBIC*)

Le mécanisme de cette mesure est relativement simple [Leamy82] : des paires électrons-trous sont créées par le faisceau électronique. Elles atteignent, par diffusion, la zone de charge d'espace où elles sont séparées par le champ électrique qui empêche ainsi leur recombinaison. Les électrons et les trous sont collectés sous la forme d'un courant induit qui est ensuite traité comme un signal synchronisé au balayage du microscope, identique à celui utilisé pour les mesures de cathodoluminescence. Le courant produit par les diodes est ensuite utilisé pour former l'image dite d'*EBIC*. Les seuls résultats expérimentaux probants sur l'existence d'une zone de charge d'espace induite par la formation d'une jonction p/n en diamant furent pour la première fois révélés en 2002 par les Dr. Sekigushi et Koizumi [Sekiguchi02]. Une étude théorique a également été proposée par le Dr. Koide en 2003 [Koide03]. Ils montrèrent en particulier que la zone de charge d'espace était principalement étendue du côté de la zone p malgré la concentration de dopants de type n 40 fois supérieure. Les qualités électroniques des couches alors utilisées pour la formation de la jonction p/n présentaient à cette époque de faibles valeurs de mobilités et de fortes valeurs de compensation. Nous verrons sur le second dispositif étudié que les mesures d'*EBIC* permettent aujourd'hui de définir une zone de charge d'espace quasi-symétrique.

Pour ce premier dispositif, les figures V-12 illustrent une image *MEB* en électrons secondaires (figure a) et l'image correspondant de courant induit à travers la diode p/n connectée (figure b).

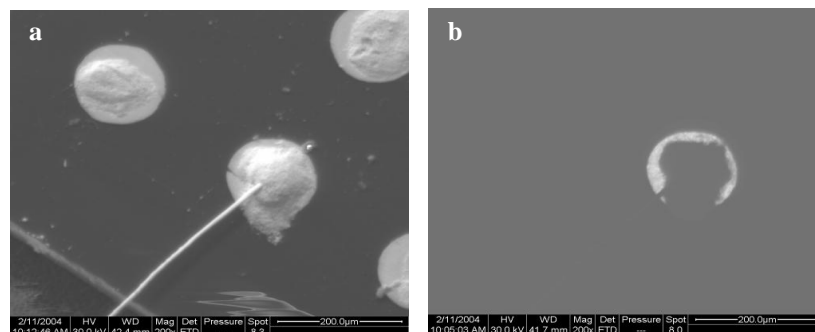


Figure V- 12 Images MEB en électrons secondaires (a) et EBIC (b) correspondant à la diode p/n connectée par un fil d'or et fixé par de la pâte d'argent

Un signal de courant induit est bien observé à partir de la seule diode connectée (contraste blanc sur l'image b) prouvant la présence d'une zone de charge d'espace. Aucun résultat quantitatif ne pouvant être tiré de la mesure sur ce dispositif, nous développerons l'interprétation de ces mesures d'*EBIC* pour le second dispositif et déterminerons la longueur de diffusion des porteurs minoritaires.

4. Jonction p/n et diodes associées sur substrat non dopé

a- Conditions de croissance de l'empilement

La jonction p/n réalisée sur le substrat de diamant Ib orienté {111} non dopé a été produite au *NIMS*. Les conditions de croissance des couches n et p, résumées dans le tableau V-1, correspondent à celles usuellement utilisées et décrites aux chapitre III et IV.

	CH ₄ /H ₂ (%)	[D]/[C] (ppm)	Concentration de dopants (at/cm ³)	Epaisseur de couche (μm)
Couches dopées bore de type p ⁺	0.05	500	10 ¹⁹	1
Couches dopées bore de type p	0.05	5	10 ¹⁸	0.7
Couches dopées phosphore de type n	0.05	40	7x10 ¹⁷	1
Couches dopées phosphore de type n ⁺	0.05	5000	quelques 10 ¹⁹ (variable)	>1

Tableau V- 1 Conditions de croissance de la jonction p/n en diamant {111} sur substrat Ib non dopé prétraité RIE à l'oxygène

En toute rigueur, deux couches de type p⁺ / p ont été homoépitaxiées simultanément; l'une sur un substrat Ib {111} non traité, l'autre prétraité *RIE* à l'oxygène. Elles correspondent typiquement à celles que nous avons décrites à la fin du chapitre IV. Celle réalisée sur le substrat prétraité *RIE* présentant une meilleure morphologie de surface, nous avons donc choisi de réaliser notre jonction p/n sur ce substrat prétraité. La figure V-13 présente les images optiques « Nomarski » de la surface finale après croissance de la jonction p⁺ / p / n / n⁺.

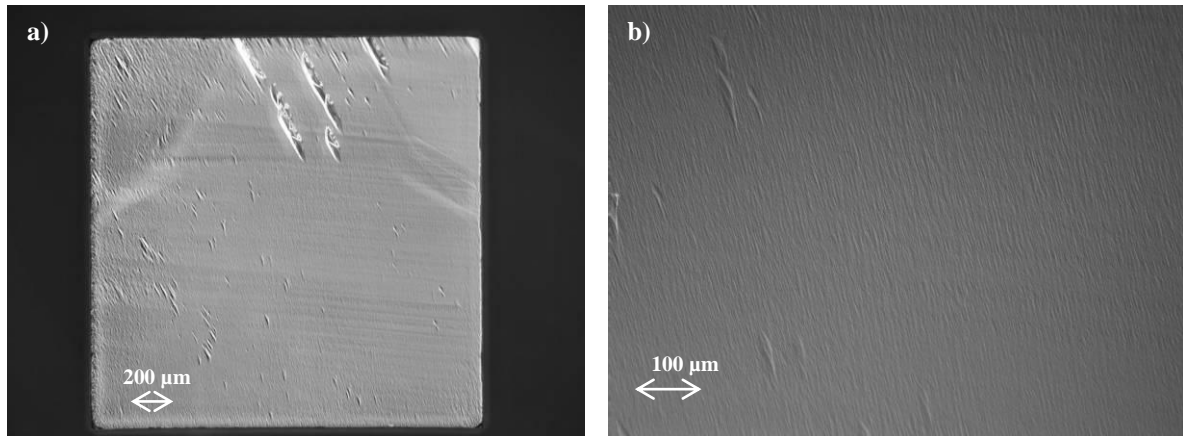


Figure V- 13 Images "Nomarski" de a) la surface totale b) à plus fort grossissement de la jonction p/n {111} homoépitaxiée sur le substrat Ib prétraité RIE à l'oxygène

La morphologie de surface semble de bonne qualité sans aucun défaut dû au polissage du substrat. Sur ce point, l'efficacité du prétraitement du substrat est totalement prouvée !

b- Réalisation des diodes p/n

Les différentes étapes de fabrication des diodes sont résumées sur les figures V-14 a) à f).

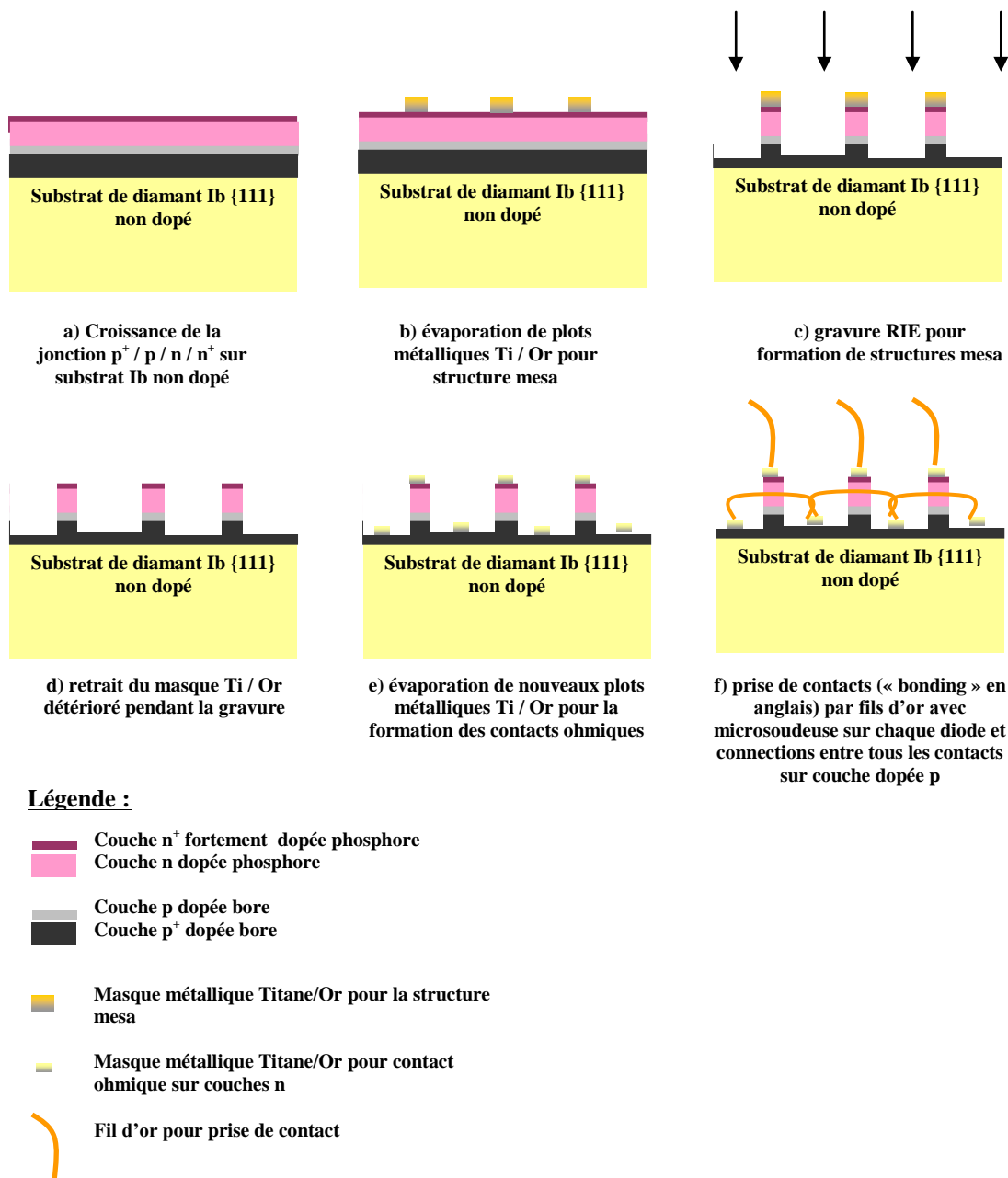


Figure V- 14 Processus complet de la fabrication de diodes p/n réalisées au NIMS sur substrat de diamant Ib {111} non dopé.

L'image *MEB* de la figure V-15 donne une vue du bord de la structure mesa, l'échantillon est ici incliné de quelques degrés.

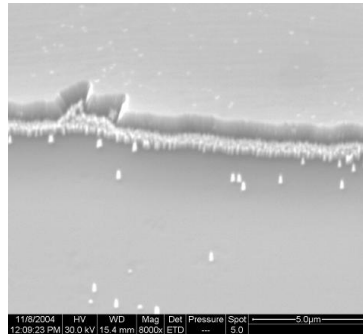


Figure V- 15 Image MEB inclinée du bord d'une diode p/n en structure mesa sur substrat non dopé

On s'aperçoit ici, que la gravure *RIE* pour la formation des dispositifs sur cet échantillon a créé beaucoup moins de défauts que celle sur le précédent échantillon (diodes sur substrat fortement dopé). Seules quelques « aiguilles » ont subsisté notamment près du contact. Afin d'expliquer ce phénomène, nous supposons que les plots métalliques ne sont pas exactement évaporés perpendiculairement à la surface impliquant alors un effet d'ombrage sur un bord créant du « micromasking » localement sur un côté du plot.

L'échantillon terminé est donné sur la figure V-16 sur laquelle sont également repérées quelques diodes pour lesquelles nous donnerons plusieurs résultats de caractérisation.

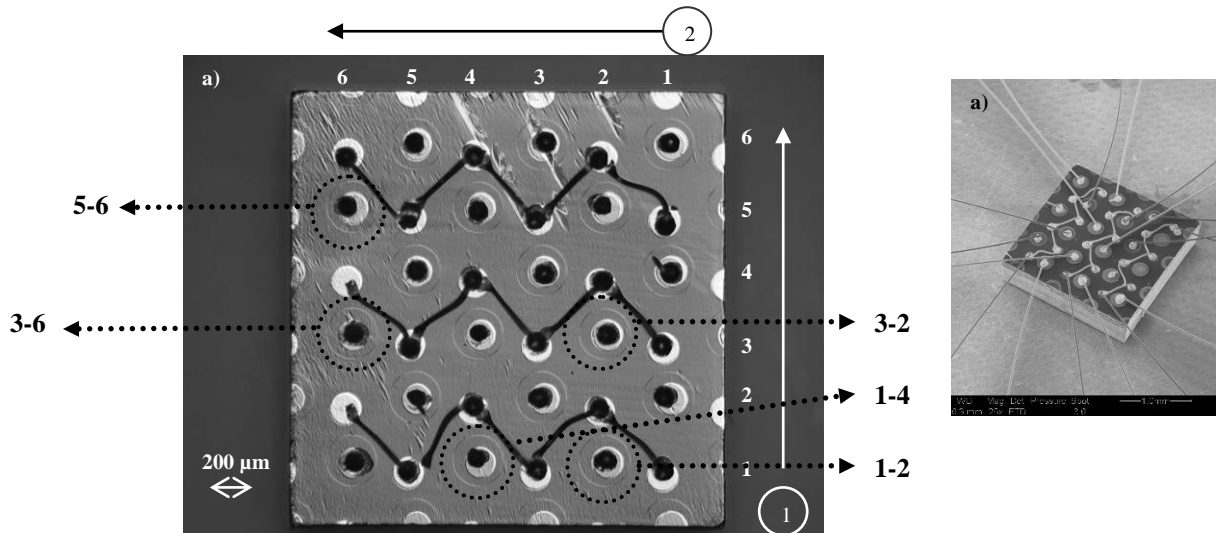


Figure V- 16 a) Image "Nomarski" et identification de quelques diodes b) Image MEB de toutes les diodes après câblage par microsoudureuse

c- Caractérisations

c-1 Caractéristiques I(V)

c-1.1 I(V) à température ambiante

Des mesures I(V) ont été réalisées au *NIMS* sur chacune des diodes p/n sous ultra vide à $\sim 10^{-8}$ Torr.

En première approche, nous donnons toutes les caractéristiques I(V) de chacune des diodes à température ambiante sur la figure V-17. Cette figure nous permet de constater que chaque courbe présente une caractéristique montrant un redressement de courant et ceci indépendamment de la position de la diode sur l'échantillon.

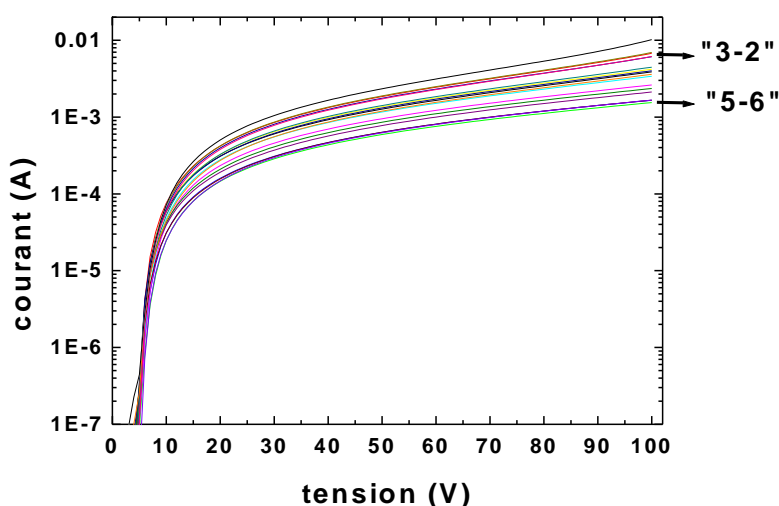


Figure V- 17 Courbes I (V) à température ambiante de toutes les diodes p/n sur substrat Ib non dopé

Si l'on regarde d'un peu plus près deux diodes, celles dénommées « 5-6 » et « 3-2 » sur l'image « Nomarski » de la figure V-16, on s'aperçoit que leur morphologie est assez différente, voir la figure V-18. Celle qui montre la meilleure caractéristique I(V) laissant passer un courant plus important pour la même valeur de tension de polarisation, présente la meilleure morphologie de surface.

L'origine des défauts de croissance que l'on observe en densité plus importante sur la diode « 5-6 » n'a pas été déterminée. Il est probable que ces défauts répartis aléatoirement détériorent la qualité des diodes.

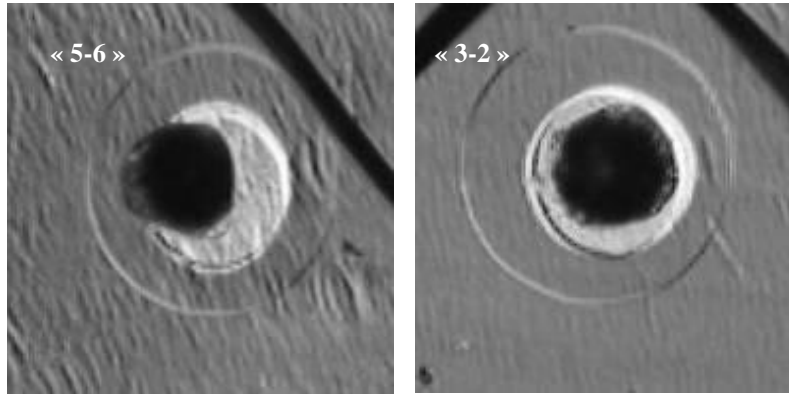


Figure V- 18 Images "Nomarski" à fort grossissement de deux diodes p/n (« 5-6 » et « 3-2 »)

Concentrons nous à présent sur la caractéristique I(V) de la figure V-19 offrant un redressement de $\sim 10^5$ à +/- 30 V obtenu pour la diode « 1-4 ».

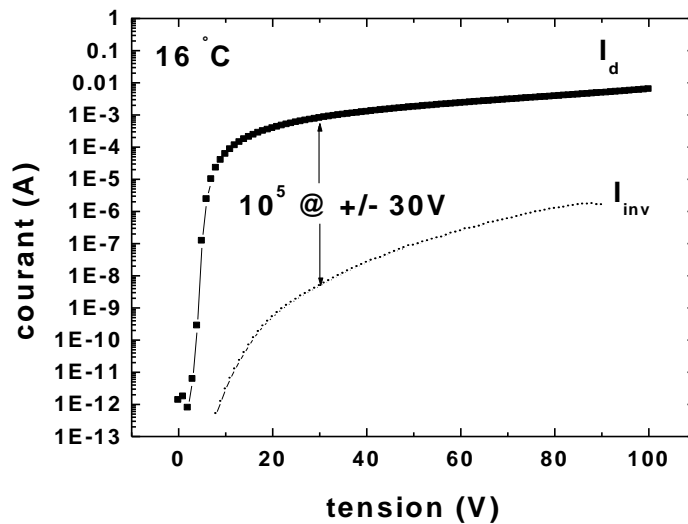


Figure V- 19 Courbe I(V) à température ambiante d'une diode p/n en structure mesa sur substrat Ib non dopé de redressement 10^5 à +/- 30V

La première remarque que l'on peut faire sur cette faible valeur de redressement est sa diminution de 10^5 par rapport à celle que l'on avait obtenue pour la même valeur de polarisation d'une diode de la jonction p/n précédente sur le substrat fortement dopé bore. Cette diminution provient principalement du courant de fuite plus important très certainement engendré par la gravure des diodes en structure mesa. Les valeurs de résistances série et parallèle calculées sont respectivement de ~ 10 K Ω et ~ 50 M Ω au lieu de 4 K Ω et 10^{14} Ω mesurées précédemment. Les courants de fuite engendrés par la formation de structure mesa

sont beaucoup trop importants ; une optimisation de la gravure du diamant sera nécessaire pour permettre la fabrication de dispositifs électroniques.

Deux paramètres ont pourtant été améliorés :

- la valeur du coefficient d'idéalité qui est maintenant autour de 3, notamment à cause du passage plus efficace du courant à travers cet empilement de meilleure qualité cristalline
- et
- la valeur de la tension de seuil

Les dispositifs qui ont été présentés ici font partie des tous premiers étudiés en Europe.

Leurs caractéristiques fournissent d'ores et déjà des résultats très prometteurs que nous avons pu confirmer par des mesures électriques à température variable.

c-1.2 I(V) en fonction de la température

Les courbes I(V) de la figure V-20 correspondent à celles de la diode « 1-4 » de la température ambiante à 400 °C par pas de 100 °C. Le comportement de chaque diode reste constant même à plus haute température. A tension de polarisation V constante de 20V, on obtient une variation de I_D quasi linéaire. La variation approximative de I_D avec la température entre 100°C et 400°C par les mesures expérimentales est d'environ 2.4 mA / °C.

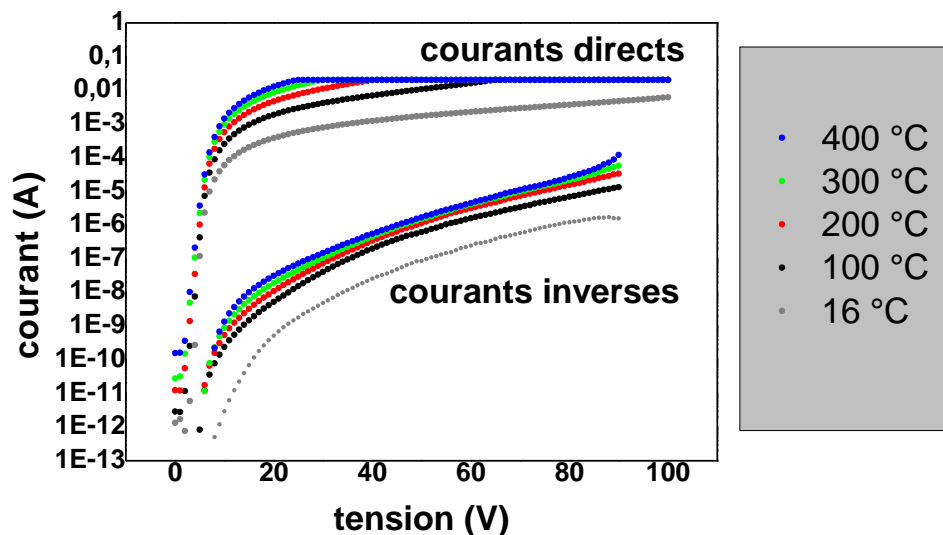


Figure V- 20 Courbes I(V) en température de la diode p/n « 1-4 » sur substrat Ib {111} non dopé ;
Saturation du courant mesuré à 0,05 A.

Grâce à ces mesures préliminaires nous prouvons la possibilité de faire fonctionner des dispositifs en diamant à haute température et pouvons prévoir qu'en restant sous ultraviolet, des températures de fonctionnement supérieures à 400°C pourront être atteintes.

Les limites de performances sont encore une fois principalement reliées aux courants de fuite ; pour d'éventuelles applications industrielles, leur minimisation devra à terme être optimale.

En vue de préciser la nature des défauts présents dans la jonction, nous avons de nouveau procédé à des mesures de cathodoluminescence / électroluminescence.

c-2 Cathodoluminescence

Les mesures de cathodoluminescence à 80K pour des énergies d'accélération des électrons de 5 keV, 10 keV, 15 keV et 20 keV ont été réalisées en focalisant le faisceau sur la mesa (couche n en surface). Les spectres dans la zone excitonique sont donnés sur les figures V-21 a), b), c) et d).

La proximité des positions des pics excitoniques repérés ici rend difficile leur identification ; cependant, si l'on se concentre particulièrement sur les excitons liés au phosphore BE_{TO}^P à ~ 238.8 nm et BE_{LO}^P à ~ 239.8 nm et sur les excitons liés au bore BE_{TO}^B à ~ 237.8 nm et BE_{LO}^B à ~ 238.7 nm, on constate leur apparition successive à mesure que l'on augmente l'énergie du faisceau d'électrons incidents.

A 5 keV qui correspond à une profondeur de pénétration d'environ 400 nm, seuls les signaux des couches n^+ / n sont émis impliquant la seule présence de BE_{TO}^P et de la bande lumineuse autour de 260 nm qui pourrait être reliée à la présence importante de phosphore.

A 10 keV qui correspond à une profondeur de pénétration d'environ 800 nm, les signaux relatifs à la couche n sont encore plus présents (on distingue BE_{LO}^P). La diminution de la bande autour de 260 nm indique bien que l'on s'éloigne de la couche n^+ en surface.

A 15 keV, qui correspond à une profondeur de pénétration d'environ 1.2 μ m, les signaux émis proviennent principalement de la zone dopée bore.

A 20 keV, qui correspond enfin à une profondeur de pénétration d'environ 1.6 μ m, seul l'exciton lié au bore BE_{TO}^B est émis. La qualité cristalline de cette couche plus fortement dopée bore n'est sans doute pas suffisante pour permettre l'émission de BE_{LO}^B .

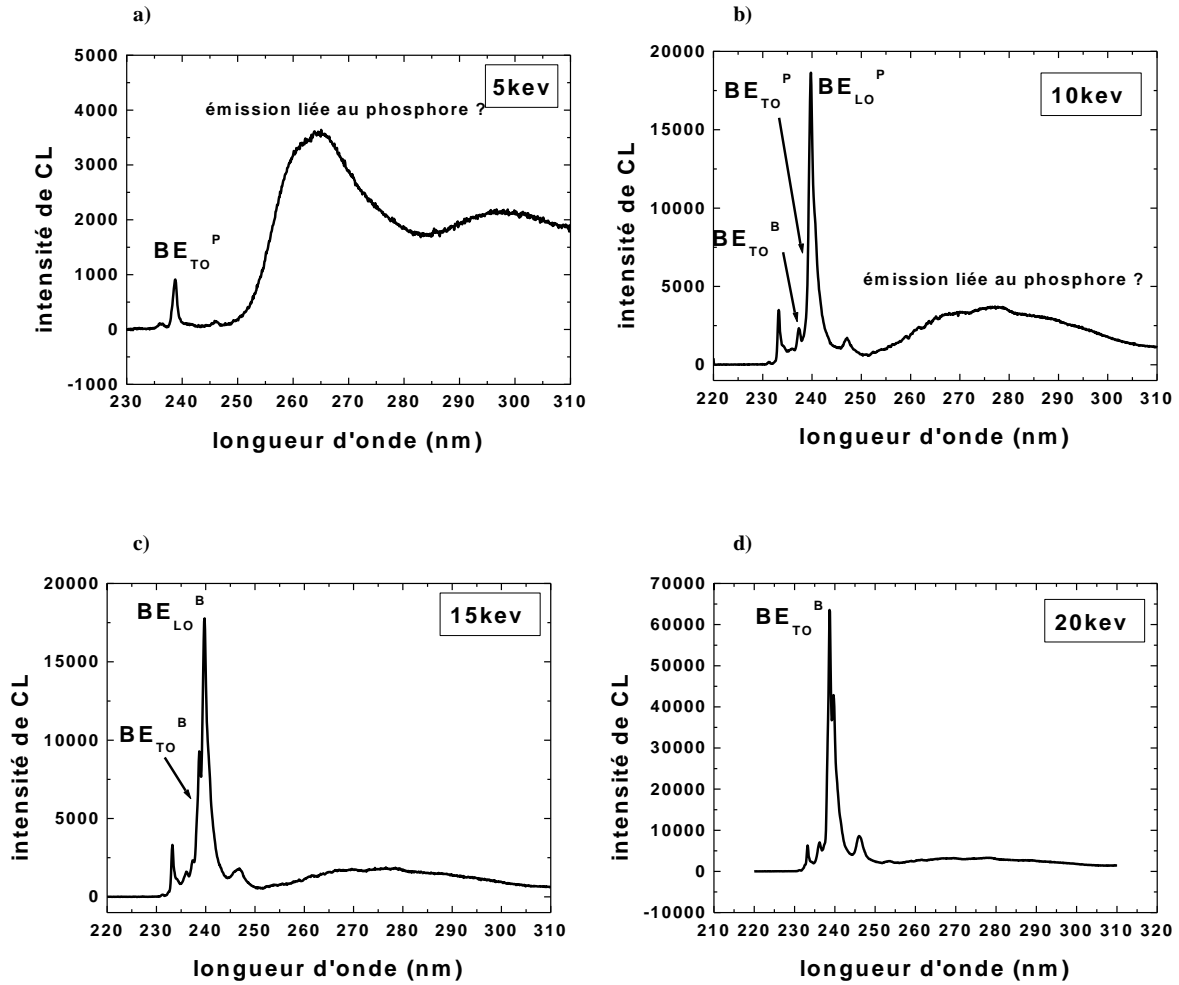


Figure V- 21 Spectres de cathodoluminescence à 80K de la jonction p/n sur substrat Ib {111} non dopé pour des énergies d'accélération de a) 5 keV b) 10 keV c) 15 keV d) 20 keV

Nous allons voir que la présence significative d'impuretés dopantes bore et phosphore a finalement permis la détection d'électroluminescence dans la gamme de longueur d'onde de l'UV.

c-3 Electroluminescence

Le spectre d'électroluminescence de la figure V-22 montre en effet une émission autour de 278 nm (~ 4.45 eV) d'intensité importante.

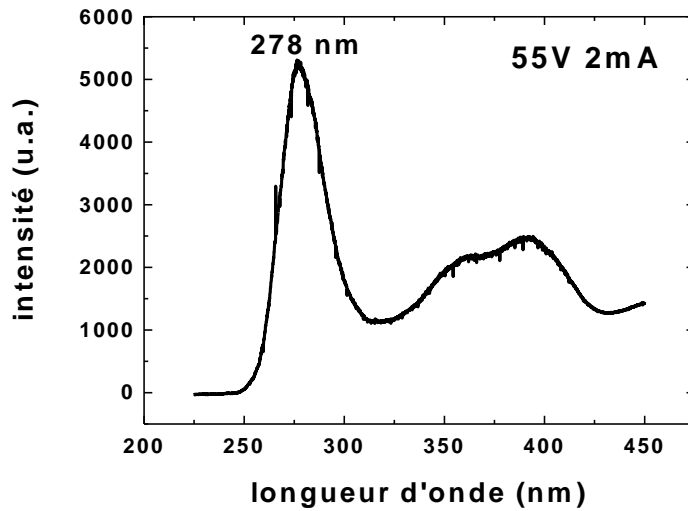


Figure V- 22 Spectre d'électroluminescence d'une diode p/n sur substrat non dopé sous tension de polarisation de 55 V

Ce signal est proche de celui observé dans des couches minces de diamant dopées au bore [Lawson95]. Il est difficile à ce stade de l'étude de justifier la présence d'une telle émission. De la même manière, l'origine de la luminescence autour de 370 nm n'est pas très claire mais un début de luminescence à ~ 400 nm peut être attribuée à l'émission de bande A. Si l'on augmente la tension de polarisation, on constate sur le spectre de la figure V-23, l'apparition d'une bande de luminescence de faible intensité proche de la valeur du gap.

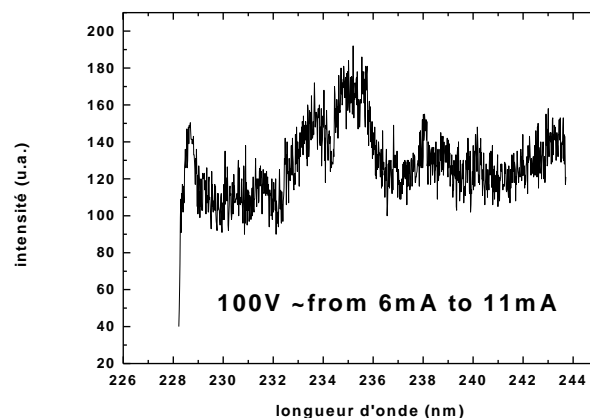


Figure V- 23 Spectre d'électroluminescence dans l'UV pour une forte polarisation de 100V de la diode

Ce résultat très positif confirme la meilleure qualité de cette jonction. En augmentant davantage la tension de polarisation, les recombinaisons radiatives pourraient être favorisées et une plus forte émission autour de 235 nm pourrait être observée. Cette luminescence existante dans le domaine visible a donc pu être observée : une photo de la lumière bleue émise autour du contact est donnée sur la figure V-24.

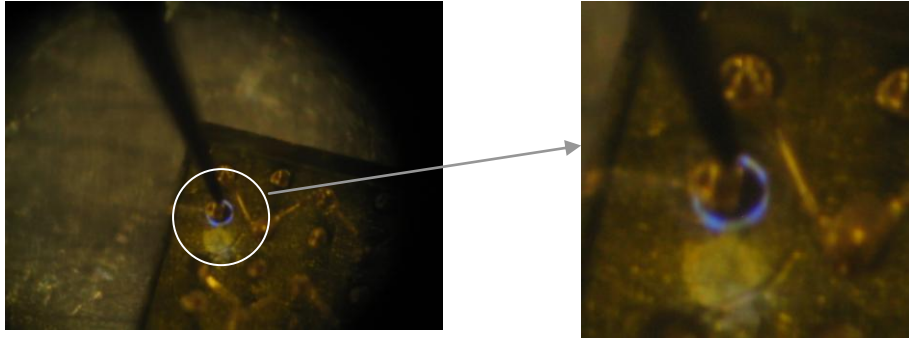


Figure V- 24 Photo de la lumière bleue émise par une diode p/n sur substrat Ib {111} non dopé (lumière observable à partir de quelques dizaines de μA)

Ces mesures d'électroluminescence nous ont permis de révéler une luminescence dans l'UV attendue pour ces diodes p/n en diamant. Cette émission n'avait pas pu être observée sur les diodes réalisées sur le substrat fortement dopé bore, ces dernières contenant une densité de défauts (émission de bande A) beaucoup trop importante. Néanmoins, des valeurs de courant de polarisation directe élevée (de quelques mA) ont été utilisées risquant d'échauffer la diode. Afin d'évaluer l'amplitude de ce phénomène, nous avons procédé à une étude par spectrométrie Raman.

c-4 Mesures micro-Raman : échauffement de la diode p/n

Nous avons vu au chapitre II, dans la description de la spectroscopie micro-Raman, que la position de la raie Raman du premier ordre dépendait de la température. Par ces mesures Raman sur une diode émettrice de lumière, sous différentes polarisation, il est ainsi possible de déterminer l'échauffement de celle-ci selon que la raie est décalée ou non. Les mesures effectuées sous différentes polarisations de diode de 0V à 112V sont reportées dans le tableau V-2.

	Fréquence (cm ⁻¹)
Sans polarisation	1332.14
45V 1mA	1332.08
80V 3mA	1332
100V 8mA	1331.64
112V 16mA	1331.44

Tableau V- 2 Mesures de la position de la raie Raman sous différentes polarisations d'une diode p/n en diamant

Nous calculons un très faible décalage de la position vers les basses fréquences au fur et à mesure que l'on augmente la polarisation. Le décalage du pic Raman pour le diamant en fonction de la température a été établi à plusieurs reprises par Krishnan en 1946 [Krishnan46], Wang et al. en 1990 [Wang90], Herchen et Cappelli en 1991 [Herchen91] ou encore en 2003 par Mermoux et al. [Mermoux03]. Malgré les très faibles valeurs de décalage de la raie Raman mesurées, nous pouvons estimer une température minimale d'échauffement de la diode autour de 70°C pour une puissance de 1,8 W.

Cette étude s'est inspirée des travaux sur des diodes SiC menés par Aurélie Thuaire, doctorante au *LEPMI*. Son travail a servi de référence au nôtre et nous pouvons pour la première fois comparer les performances de diodes SiC et des diodes diamant. Nous nous apercevons alors que les diodes SiC, pourtant de très bonne qualité cristalline, créent un décalage de la raie Raman de 1.5 cm⁻¹ pour une puissance de 50 mW (avec tension de seuil de 2,8V, inférieure à celle du diamant). Ce décalage correspond à un échauffement de ~130 °C. Ce nouveau résultat est de nouveau révélateur de l'avantage intrinsèque du matériau diamant, sa conductivité thermique exemplaire.

Remarque : Le décalage mesuré est bien celui caractéristique de l'échauffement de la diode, et non du au laser, la puissance laser n'influant pas la position de la raie Raman sur la diode.

De nouveaux résultats de mesures Raman comparés à la cathodoluminescence vont maintenant être discutés.

c-5 Comparaison cartographies Raman/cathodoluminescence

Afin de mettre en évidence des défauts structuraux présents au niveau de la jonction p/n homoépitaxiée sur le substrat {111} non dopé prétraité *RIE* à l'oxygène, une comparaison

entre cartographies Raman et cathodoluminescence a pour la première fois été réalisée au niveau d'une diode en structure mesa.

Les figures V-25 montre un premier résultat d'imagerie Raman mesurée sur la structure mesa d'une diode p/n choisie aléatoirement. En figure (a) est donnée une photographie repérant la zone mesurée. En (b) et (c) sont respectivement données les paramètres des pics Raman pertinents sur la zone repérée : la position en fréquence du signal Raman du premier ordre et la largeur à mi-hauteur de la Lorentzienne ajustée à ce pic.

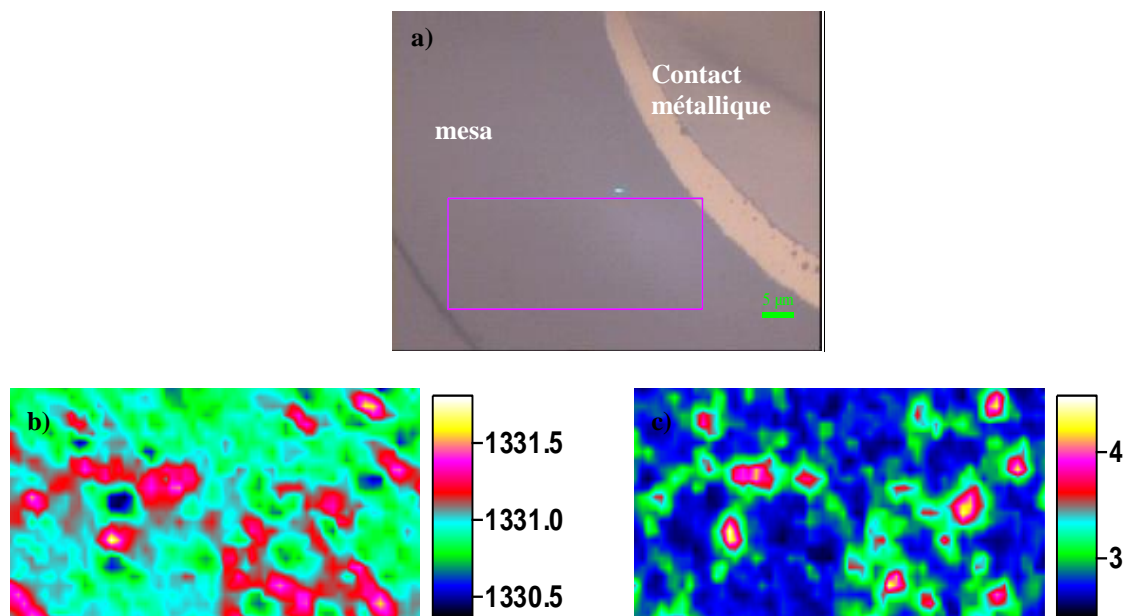


Figure V- 25 Résultats de cartographies Raman au niveau de la mesa d'une diode p/n sur substrat non dopé pré-traité RIE

Nous pouvons très clairement observer des changements significatifs de la position du pic Raman et de la largeur à mi-hauteur de celui-ci en plusieurs endroits sur la zone mesurée. En première approche, il est ici possible de conclure sur la présence locale de défauts au niveau de la jonction p/n. Le décalage vers les hautes fréquences de ces défauts sous-entend l'existence de contraintes en compression et l'augmentation de la largeur à mi-hauteur témoigne de nouveau de la réduction de la durée de vie des phonons révélatrice de variations de réseau créées par ces défauts « ponctuels », en densité de $\sim 4 \times 10^{-2} / \mu\text{m}^2$.

Par cartographie de cathodoluminescence, nous avons cherché à confirmer l'existence des défauts mis en évidence par Raman et à définir leur origine. La figure V-26a) donne tout d'abord une image en électrons secondaires effectuée au niveau de la même diode p/n en structure mesa que celle précédemment mesurée. Les résultats de mesures de cathodoluminescence correspondants sont présentés sur les figures b) à e) respectivement à

237 nm (zone excitonique), 260 nm (luminescence liée à la présence d'impuretés dopantes), 420 nm (émission de bande A) et 735 nm (luminescence due à la présence de silicium).

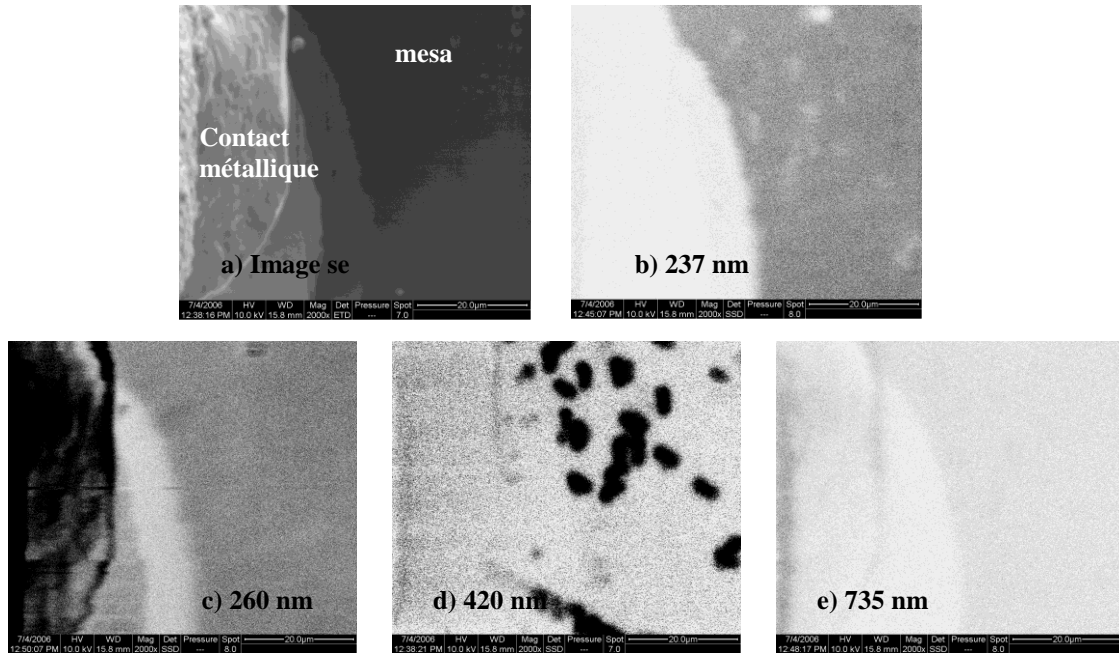


Figure V- 26 Résultats de cartographies de cathodoluminescence au niveau de la mesa d'une diode p/n sur substrat non dopé pré-traité RIE a) image en électrons secondaires b) cathodoluminescence à 237 nm c) 260 nm d) 420 nm e) 735 nm

Ces résultats permettent de nouveau de conclure à la présence de variations locales associées à la zone excitonique (figure b) et à l'émission de Bande A (figure d). En effet, nous pouvons observer en (b), une émission excitonique plus faible (points blancs) à différents endroits de la mesa et en (d), nous constatons une forte émission de Bande A (points noirs) aux mêmes endroits. Aucune variation d'intensité n'a cependant été détectée à 260 nm et 735 nm.

L'interprétation de ces résultats nous permet d'identifier les défauts précédemment révélés par Raman comme des dislocations émergentes en densité équivalente de $\sim 2 \times 10^{-2} / \mu\text{m}^2$. Leur présence au niveau d'une diode p/n en diamant a ici été pour la première fois mise en évidence grâce à la comparaison de mesures Raman qui ont permis de révéler la présence de ces défauts et aux mesures de cathodoluminescence qui ont permis d'identifier leur nature. L'origine de ces dislocations pourrait de nouveau être attribuée au prétraitement RIE du substrat qui, comme nous l'avons déjà évoqué, peut engendrer ce type de défauts. Malgré l'efficacité incontestable de ce prétraitement, son optimisation reste malgré tout une priorité.

Pour terminer, nous allons enfin décrire les mesures d'EBIC réalisées sur cette deuxième série de diodes, qui permettent en outre une première interprétation quantitative de la mesure

c-6 EBIC

Les images d'*EBIC* que nous allons discuter ont été réalisées avec le Prof. Daniel Araujo, également spécialiste de cathodoluminescence. Les résultats qui ont inspiré cette étude ont principalement été publiés en 1993 et 1994 [Araújo93] [Araújo94].

Nous nous intéressons à une des diodes p/n réalisée au *NIMS* sur le substrat Ib {111} non dopé. Une représentation schématique de la structure mesa et de la configuration de la mesure est donnée sur la figure V-27.

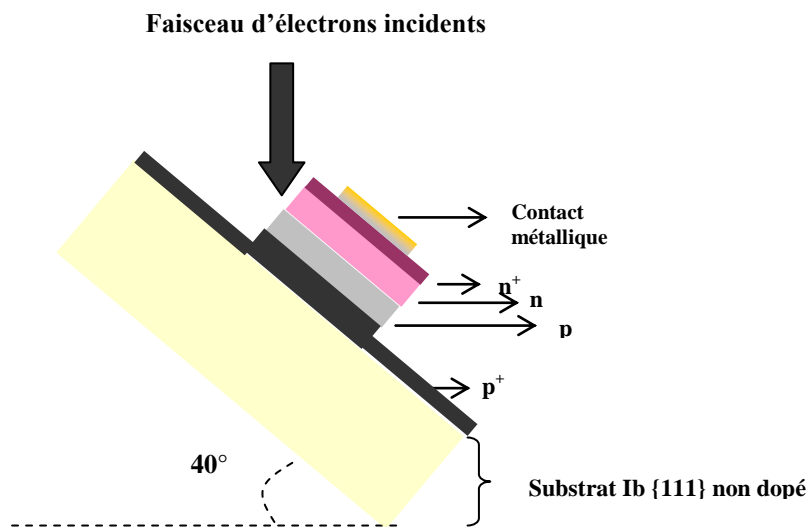


Figure V- 27 Illustration de la structure mesa dans la configuration de mesure de courant induit

Pour comparaison, une image obtenue simultanément en électrons secondaires sera systématiquement présentée à gauche de celle formée par l'*EBIC*. Les premières images de courant induit, figures V-28 b) et d) à plus fort grossissement pour une meilleure visualisation, sont obtenues pour un faisceau d'électrons incidents de 10 keV et une inclinaison de l'échantillon de 40 °.

Le courant induit observé au niveau de la mesa confirme la création d'une zone de charge d'espace à la jonction p/n. Grâce à cette configuration de mesure, nous allons enfin pouvoir mesurer de nouveaux paramètres du transport de charge dans le diamant, en évaluant la variation spatiale de la densité de charge liée à ce courant induit. La physique des semi-conducteurs donne une variation en exponentielle de (x / L) . L est la longueur de diffusion des charges positives ou négatives.

Pour une détermination quantitative précisément au niveau de la jonction, nous avons réalisé une nouvelle mesure de courant induit, montrée sur la figure V-29, sur cette même diode avec une énergie de faisceau d'électrons incidents réduite à 5 keV.

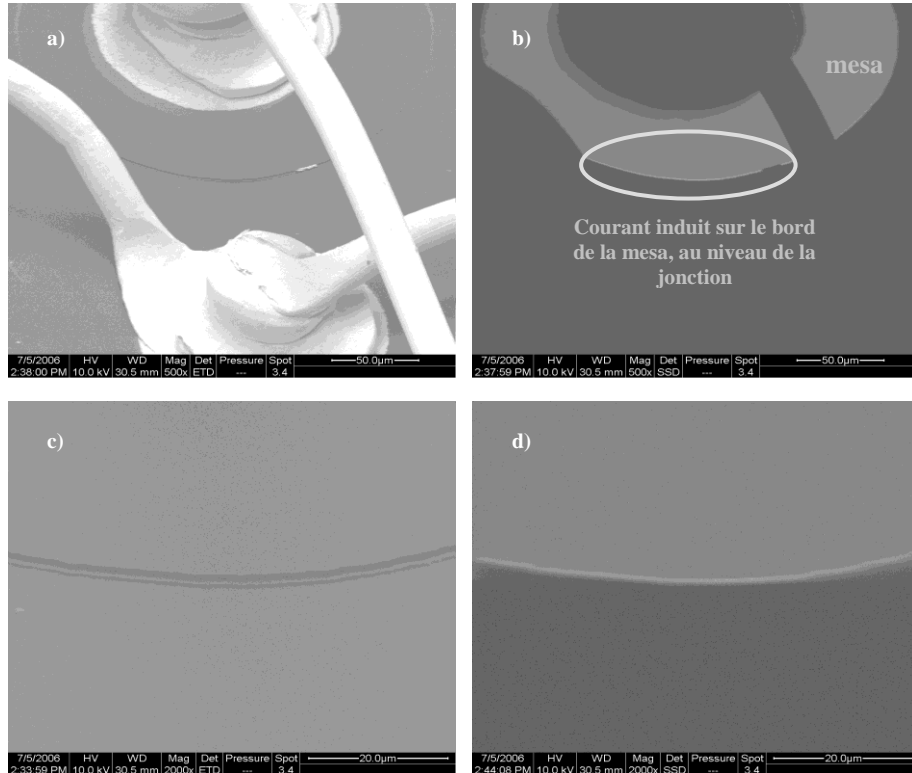


Figure V- 28 Images d'une diode p/n en structure mesa inclinée de 40° en a), b) électrons secondaires et c), d) courant induit sur le bord de la mesa pour un faisceau d'électrons d'énergie de 10 keV

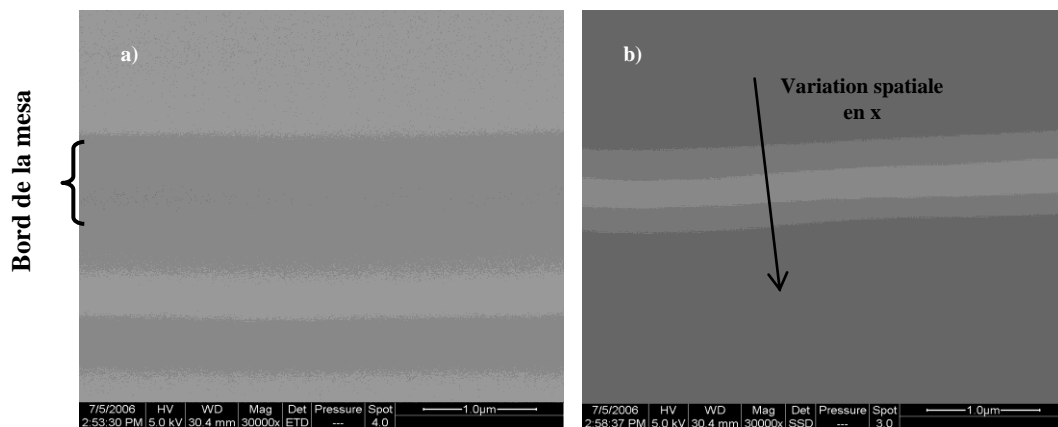


Figure V- 29 Images en a) électrons secondaires et b) courant induit sur le bord de la mesa pour un faisceau d'électrons d'énergie de 5 keV

L'image *MEB* à très fort grossissement ne donne pas une netteté parfaite mais nous distinguons malgré tout le bord de la mesa. Sur l'image d'*EBIC*, nous observons clairement le courant induit au niveau de la jonction. Par transcription du contraste détectée sur cette image, un profil de variation de la densité de charge grâce au logiciel « DigitalMicrograph » a été défini. Ce résultat définitif est illustré sur la figure V-30.

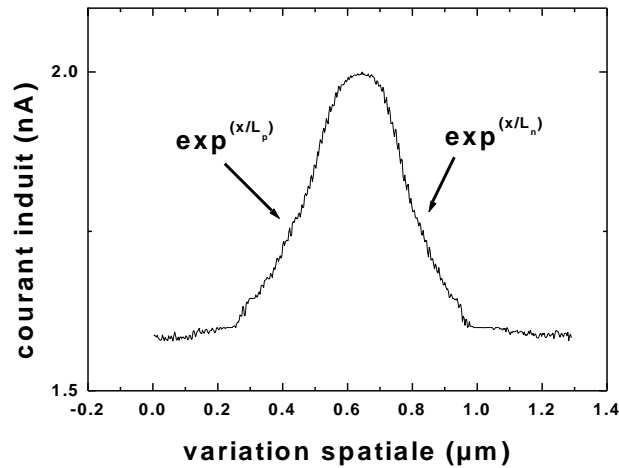


Figure V- 30 Variation spatiale du courant induit dans la zone de charge d'espace étendue sur 730 nm

Pour une largeur de zone d'espace mesurée qui s'étend sur 0.73 µm, la variation exponentielle du courant de chaque côté de la jonction est vérifiée sur la courbe. En tenant compte de l'inclinaison de 40° et en reportant la valeur maximum du courant induit mesuré de 2 nA sur le point donnant le contraste le plus fort, nous avons extrait les valeurs de longueurs de diffusion des électrons et des trous respectivement de ~0.22 µm et de ~0.36 µm.

Les longueurs de diffusion des deux types de porteurs sont relativement proches. Simplement pour comparaison, Yuan et al. ont publié en 2005 des longueurs de diffusion d'électrons et de trous respectivement autour de 0.5 – 0.7 µm et 0.2 – 0.3 µm dans une jonction p/n en nitrure de bore [Yuan05].

5. Conclusion

Par cette étude de deux jonctions p/n, l'une homoépitaxiée sur un substrat {111} fortement dopé bore, l'autre sur un substrat {111} non dopé, nous avons pu mettre en évidence la possible réalisation de diodes p/n en diamant {111}.

De très bons coefficients de redressement atteignant 10^{10} à +/- 30 V ont notamment été mesurés sur la première jonction. Indépendamment du dispositif, nous avons noté une diminution évidente de la valeur de ce coefficient par la fabrication de diodes en structure mesa. Le procédé de gravure du diamant n'étant pas encore complètement optimisé, les courants de fuite induits sur les bords de mesa deviennent alors très importants.

Les diodes réalisées sur le substrat fortement dopé bore ont encore montré des performances limitées, notamment par leur luminescence exclusivement détectée dans le visible. Les spectres de cathodoluminescence et d'électroluminescence font en effet apparaître une forte luminescence entre ~ 500 nm et ~ 650 nm dénotant alors de la présence de défauts d'azote.

Les secondes diodes réalisées sur le substrat non dopé ont en revanche permis de mettre en évidence une électroluminescence dans l'UV. Ce premier résultat ajouté aux caractéristiques I(V) mesurées à plus haute température ainsi que le minime échauffement sous polarisation supérieure à 100V ont été une bonne indication quant à l'augmentation des performances des diodes réalisées sur substrat de diamant non dopé.

Grâce à ce dispositif de meilleure qualité que le précédent, il nous a également été possible de révéler pour la première fois des valeurs de longueurs de diffusion des électrons et des trous respectivement de ~0.22 μm et de ~0.36 μm .

Cette étude sur la caractérisation de diodes p/n en diamant a permis de révéler des résultats très prometteurs quant à une future application du diamant à des dispositifs électroniques pouvant fonctionner dans des conditions extrêmes.

Références Chapitre V

- [Araújo93] D. Araújo, G. Oelgart, J-D. Ganière, F. K. Reinhart, *Appl. Phys. Lett.* **62** (1993) 2992

- [Araújo94] D. Araújo, G. Oelgart, J-D. Ganière, F. K. Reinhart, *Appl. Phys. Lett.* **76** (1994) 342
- [Gheeraert00] E. Gheeraert, S. Koizumi, T. Teraji, H. Kanda, *Solid. Stat. Com.* **113** (2000) 577
- [Herchen91] H. Herchen, M. A. Cappelli, *Phys. Rev. B* **43** (1991) 11740
- [Kanda01] H. Kanda, X. Jia, *Diam. Rel. Mat.* **10** (2001) 1665
- [Kato05] H. Kato, S. Yamasaki, H. Okushi, *Appl. Phys. Lett.* **86** (2005), 222111
- [Koide03] Y. Koide, *Jpn. J. Appl. Phys.* **42** (2003) 6800
- [Koizumi01] S. Koizumi, K. Watanabe, M. Hasegawa, H. Kanda, *Science* **292** (2001) 1899
- [Koizumi97] S. Koizumi, M. Kamo, Y. Sato, H. Ozaki, T. Inuzuka, *Appl. Phys. Lett.* **71** (1997), 1065
- [Krishnan46] R. S. Krishnan, *Proc. Acad. Sci. Sect. A* **24** (1946) 45
- [Lawson95] S. C. Lawson, H. Kanda, H. Kiyota, T. Tsutumi, H. Kawarada, *J. Appl. Phys.* **77** (1995) 1729
- [Leamy82] H. J. Leamy, *J. Appl. Phys.* **53** (1982) R51
- [Makino05] T. Makino, H. Kato, M. Ogura, H. Watanabe, S. G. Ri, S. Yamasaki, H. Okushi, *Jap. J. Appl. Phys. Lett. Part 2* **44** (2005) 1190
- [Mermoux03] M. Mermoux, B. Marcus, L. Abello, N. Rosman, G. Lucazeau, *J. Raman Spec.* **34** (2003) 505
- [Mermoux04a] M. Mermoux, B. Marcus, A. Crisci, A. Tajani, E. Gheeraert, E. Bustarret, *Diam. Rel. Mat.* **13** (2004) 329
- [Mermoux04b] M. Mermoux, A. Tajani, B. Marcus, E. Bustarret, E. Gheeraert, M. Nesladek, S. Koizumi, *Diam. Rel. Mat.* **13** (2004) 329
- [Okano91a] K. Okano, H. Kiyota, T. Iwasaki, Y. Nakamura, Y. Akiba, T. Kurosu, M. Iida and T. Nakamura, *Solid. Stat. Electronics.* **34** (1991) 139
- [Okano91b] K. Okano, T. Iwasaki, H. Kiyota, T. Kurosu, M. Iida, *Thin Solid Films* **206** (1991) 183
- [Okano91c] K. Okano, H. Kiyota, T. Iwasaki, T. Kurosu, M. Iida and T. Nakamura, *Appl. Phys. Lett.* **58** (1991) 840
- [Schternuschulte99] H. Schternuschulte, K. Thonke, R. Sauer, S. Koizumi, *Phys. Rev. B* **59** (1999) 12924
- [Sekiguchi02] T. Sekiguchi, S. Koizumi, *Appl. Phys. Lett.* **81** (2002) 1987

- [Teraji99] T. Teraji, S. Koizumi, S. Mita, A. Sawabe, H. Kanda, *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** (1999) L096
- [Tajani03] A. Tajani, M. Mermoux, B. Marcus, E. Bustarret, E. Gheeraert, S. Koizumi, *phys. stat. sol. a* **199** (2003) 87
- [Tajani04] A. Tajani, C. Tavares, M. Wade, C. Baron, E. Gheeraert, E. Bustarret, S. Koizumi, D. Araujo, *phys. stat. sol. a*, **201** (2004) 2462
- [Tavares05] C. Tavares, A. Tajani, C. Baron, F. Jomard, S. Koizumi, E. Gheeraert, E. Bustarret, *Diam. Rel. Mat.* **14** (2005) 522
- [Wang90] C. Z. Wang, C. T. Chan, K. M. Ho, *Phys. Rev. B* **42** (1990) 11276
- [Werner03] M. Werner, *Semicond. Sci. Techno.* **18** (2003) S41
- [Yuan05] X. L. Yuan, J. Niitsuma, T. Sekiguchi, M. Takase, T. Taniguchi, *Diam. Rel. Mat.* **14** (2005) 1955

Liste des figures Chapitre V

Figure V- 1	Processus de diffusion de porteurs dans une jonction p/n et alignement des niveaux de Fermi juste avant le contact des deux zones	170
Figure V- 2	Représentation schématique de la jonction p/n en diamant {111} réalisée sur substrat Ib fortement dopé bore.....	173
Figure V- 3	Profils SIMS de la jonction p/n en diamant {111} réalisée au LEPES sur substrat fortement dopé bore	174
Figure V- 4	Photo de la jonction p/n réalisée sur substrat Ib {111} fortement dopé bore après évaporation des contacts ohmiques	175
Figure V- 5	Schéma de diodes p/n en structure mesa, vue en coupe	175
Figure V- 6	Images MEB d'une diode p/n en diamant sur le substrat Ib {111} fortement dopé bore.....	176
Figure V- 7	Image de la prise de contact (pâte d'argent et fil d'or) sur trois diodes p/n sur substrat fortement dopé bore	176
Figure V- 8	Caractéristique I(V) de D1 à température ambiante	178
Figure V- 9	Meilleure courbe I(V) à température ambiante mesurée sur une diode p/n en diamant {111} homoépitaxiée sur substrat fortement dopé bore.....	178
Figure V- 10	Spectre de cathodoluminescence de la jonction p/n en diamant sur substrat fortement dopé bore orienté {111}.....	179
Figure V- 11	Electroluminescence (en noir) et cathodoluminescence (en gris) d'une diode p/n en diamant {111} réalisée sur substrat fortement dopé bore émettrice de lumière visible	180
Figure V- 12	Images MEB en électrons secondaires (a) et EBIC (b) correspondant à la diode p/n connectée par un fil d'or et fixé par de la pâte d'argent.....	181
Figure V- 13	Images "Nomarski" de a) la surface totale b) à plus fort grossissement de la jonction p/n {111} homoépitaxiée sur le substrat Ib prétraité RIE à l'oxygène	183
Figure V- 14	Processus complet de la fabrication de diodes p/n réalisées au NIMS sur substrat de diamant Ib {111} non dopé.....	184
Figure V- 15	Image MEB inclinée du bord d'une diode p/n en structure mesa sur substrat non dopé.....	185
Figure V- 16	a) Image "Nomarski" et identification de quelques diodes b) Image MEB de toutes les diodes après câblage par microsoudure.....	185

Figure V- 17 Courbes I (V) à température ambiante de toutes les diodes p/n sur substrat Ib non dopé	186
Figure V- 18 Images "Nomarski" à fort grossissement de deux diodes p/n (« 5-6 » et « 3-2 »)	187
Figure V- 19 Courbe I(V) à température ambiante d'une diode p/n en structure mesa sur substrat Ib non dopé de redressement 10^5 à +/- 30V	187
Figure V- 20 Courbes I(V) en température de la diode p/n « 1-4 » sur substrat Ib {111} non dopé ; Saturation du courant mesuré à 0,05 A.	188
Figure V- 21 Spectres de cathodoluminescence à 80K de la jonction p/n sur substrat Ib {111} non dopé pour des énergies d'accélération de a) 5 keV b) 10 keV c) 15 keV d) 20 keV	190
Figure V- 22 Spectre d'électroluminescence d'une diode p/n sur substrat non dopé sous tension de polarisation de 55 V	191
Figure V- 23 Spectre d'électroluminescence dans l'UV pour une forte polarisation de 100V de la diode	191
Figure V- 24 Photo de la lumière bleue émise par une diode p/n sur substrat Ib {111} non dopé (lumière observable à partir de quelques dizaines de μ A)	192
Figure V- 27 Illustration de la structure mesa dans la configuration de mesure de courant induit.....	196
Figure V- 28 Images d'une diode p/n en structure mesa inclinée de 40° en a), b) électrons secondaires et c), d) courant induit sur le bord de la mesa pour un faisceau d'électrons d'énergie de 10 keV	197
Figure V- 29 Images en a) électrons secondaires et b) courant induit sur le bord de la mesa pour un faisceau d'électrons d'énergie de 5 keV	197
Figure V- 30 Variation spatiale du courant induit dans la zone de charge d'espace étendue sur 730 nm.....	198

Liste des tableaux Chapitre V

Tableau V- 1 Conditions de croissance de la jonction p/n en diamant {111} sur substrat Ib non dopé prétraité RIE à l'oxygène.....	182
Tableau V- 2 Mesures de la position de la raie Raman sous différentes polarisations d'une diode p/n en diamant	193

