

Caractérisation dynamique de thyristors SiC avec gâchette amplificatrice

Sigo SCHARNHOLZ^a, Kamil KOTRA^a, Ralf HASSDORF^a, Luong Viêt PHUNG^b et Dominique PLANSON^b

^a Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis (ISL)

^b Univ Lyon, INSA Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Ecole Centrale de Lyon, CNRS, AMPERE

RESUME —Cette contribution présente des thyristors SiC expérimentaux, 1,2 kV, 10 A avec une structure de gâchette amplificatrice. A l'aide de simulations SPICE il est montré que le thyristor auxiliaire ne se déclenche pas en premier si la gâchette amplificatrice ne répond pas au critère de conception. En outre, des caractéristiques dynamiques de ces thyristors ont permis d'évaluer le temps de mise en conduction et le courant crête maximal pour des impulsions demi-sinusoidales de 10 kHz et 50 Hz.

Mots-clés — *Carbure de silicium, SiC, thyristor, LTT, AGT, gâchette amplificatrice.*

1. INTRODUCTION

Grâce à ses propriétés physiques exceptionnelles, le carbure de silicium (SiC) est le matériau semi-conducteur de choix pour la réalisation de diodes et thyristors qui seront intégrés dans les futures applications de fortes puissances comme les convertisseurs et les applications pulsées. La gâchette amplificatrice représente la meilleure structure de commande pour les composants silicium de grandes dimensions comme les thyristors à contrôle de phase PCT (*phase control thyristor*) et les thyristors à commande optique LTT (*light triggered thyristor*) [1]. Avec l'amélioration constante de la qualité des plaquettes de SiC et leurs diamètres accessibles, l'intégration d'un système de commande avec une amplification interne de l'allumage devient un concept intéressant pour les thyristors à base de SiC.

L'objectif des travaux décrits dans cette contribution est l'application du concept d'une gâchette amplificatrice dans un thyristor SiC. Le concept, bien connu dans la technologie silicium (PCT et LTT) est appliqué ici pour réduire la puissance nécessaire au déclenchement du thyristor. Cela permettra de répondre aux futurs besoins civils (ferroviaire) et militaires (puissance pulsée). A cause de la taille des puces SiC actuellement accessibles, le concept d'une gâchette amplificatrice n'a pour l'instant jamais été étudié en détail. Ce concept a été appliqué d'une manière simple uniquement dans des thyristors à commande optique (LTT), qui commence à être développés sur le SiC depuis peu de temps [2, 3].

Pour étudier ce concept en détail sur le matériau SiC, nous avons conçu et réalisé un jeu de masques, comprenant un grand nombre de thyristors avec des paramètres géométriques et technologiques différents [4]. Récemment, ce jeu de masques a été utilisé sur une plaque SiC de 100 mm de diamètre pour réaliser des thyristors SiC avec gâchette amplificatrice (AGT) en

salle blanche, puis ils ont été caractérisés [5]. En complément de ces résultats, cette contribution présente des nouvelles investigations et expérimentations de thyristors SiC 1,2 kV, 10 A avec une variante au niveau de la conception de la gâchette amplificatrice. Pour cela, les caractéristiques expérimentales sont comparées avec les résultats obtenus par simulation SPICE.

2. STRUCTURE ET FABRICATION DU COMPOSANT

Les composants fabriqués sont des thyristors SiC verticaux et asymétriques. Leur couche de base-p (drift) a une épaisseur de $10 \mu\text{m}$ ($5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) et est séparée du substrat de type n ($> 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) par une autre couche p (buffer) d'une épaisseur de $4 \mu\text{m}$ ($5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$). Les couches de base-n (gâchette) et de l'anode ont des épaisseurs nominales de $2 \mu\text{m}$ ($1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) et $1 \mu\text{m}$ ($1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) respectivement. La gâchette et la terminaison JTE (*junction termination extension*) ont été fabriquées simultanément par gravure RIE (*reactive ion etching*). Une deuxième étape de gravure RIE est utilisée pour définir la longueur de la JTE et donc la mesa du composant. Ensuite la métallisation primaire de la gâchette/cathode (Ti/Ni) et de l'anode (Ni/Ti/Al) ont été réalisées séparément en utilisant de l'évaporation par faisceau électronique, lift-off, et recuit à haute température. La surface est passivée avec une couche de SiO_2 d'une épaisseur de $1 \mu\text{m}$. La métallisation finale est une couche de Al de $1 \mu\text{m}$ pour la gâchette et l'anode, et une couche Ti/Ni/Au de $0,7 \mu\text{m}$ sur la cathode (face arrière)

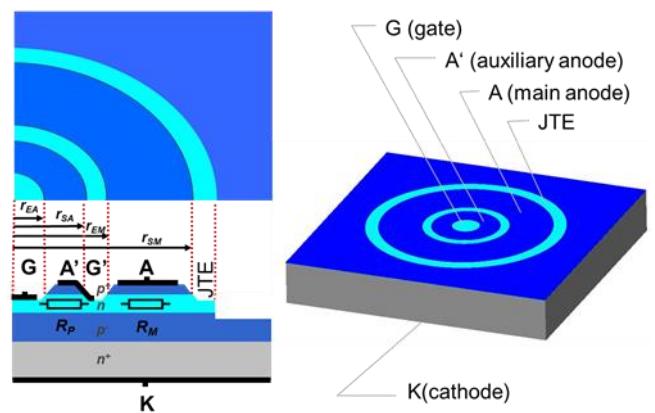


Fig. 1. Structure du thyristor SiC avec gâchette amplificatrice, contenant un thyristor dit pilote ou auxiliaire (G et A') et un thyristor principal (G' et A) avec des résistances caractéristiques R_p et R_M .

Les figures Fig. 1 et Fig. 2 montrent la structure d'un thyristor SiC avec gâchette amplificatrice, ayant des dimensions caractéristiques (rayons). Tous les thyristors ont une gâchette centrale et circulaire (G) avec un rayon de $r_{EA} = 160 \mu\text{m}$ et une anode principale (A) allant du rayon intérieur $r_{EM} = 500 \mu\text{m}$ jusqu'au rayon extérieur $r_{SM} = 1200 \mu\text{m}$. En conséquence, tous les composants ont le même rayon d'anode et donc leur thyristor principal possède la même résistance R_M (voir coupe dans la Fig. 2). Des courts circuits de l'anode sont situés à la distance r_{SM} en forme soit d'un anneau pour des composants circulaires, soit de points pour des composants carrés. Avec une longueur de la JTE de $150 \mu\text{m}$ et une marge de sécurité vers le bord, la surface de la puce mesure $3,2 \text{ mm} \times 3,2 \text{ mm}$ ($0,1 \text{ cm}^2$).

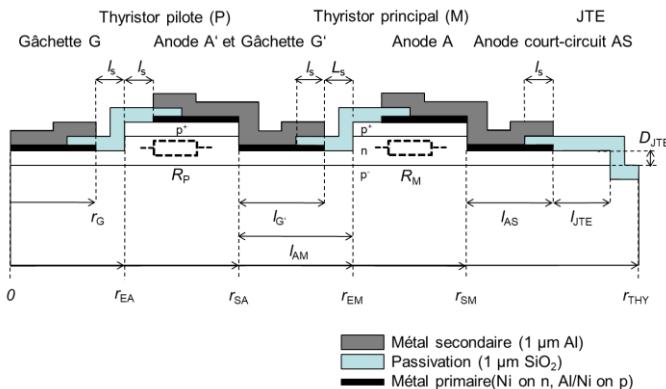


Fig. 2. Coupe (demi-cellule) de la structure supérieure p^+np^- du thyristor SiC AGT conçu, contenant un court-circuit d'anode.

La Fig. 3 montre des thyristors réalisés : en bas à droite avec une anode carrée et donc des court-circuits en forme de points, en bas à gauche avec une anode ronde et un court-circuit en forme d'anneau et en haut un thyristor simple de type SCR, dont la structure intérieure est remplacée par une simple gâchette de la même taille que la gâchette amplificatrice des deux autres.

Comme on peut le constater sur la Fig. 3, la gâchette et l'anode des thyristors SiC sont connectées par des fils de bonding en Al d'un diamètre de $50 \mu\text{m}$. La cathode en face arrière est connectée par soudure. Le support est une simple platine de test avec des pistes en cuivre. Pour éviter un claquage prématûré à la surface, le montage puce-platine est entouré par une silicone transparente.

La conception des composants sous test dans cette article envisageait des thyristors avec des valeurs nominale de $1,2 \text{ kV}$ et 10 A . Avec une marge de sécurité assez large, la couche de drift a été dimensionnée ($10 \mu\text{m}$, $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) pour une tenue en tension théorique de 2 kV . Les composants réalisés et testés sous vide montrent des tensions de claquage comprises entre $1,2$ et $1,9 \text{ kV}$ [5]. Pour atteindre la valeur nominale du courant de 10 A , une densité de courant de 100 A/cm^2 a été envisagée, et donc une taille carrée de la puce de $0,1 \text{ cm}^2$. Pour soutenir ce courant en continu au moins 9 fils de bonding d'un diamètre de $50 \mu\text{m}$ sont nécessaires.

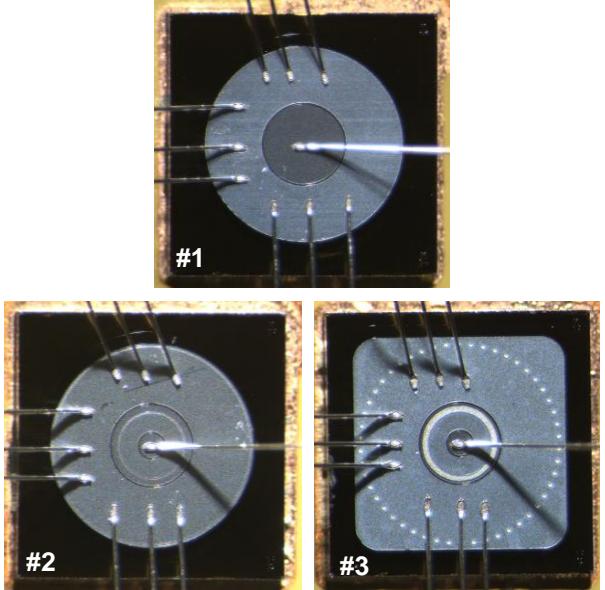


Fig. 3. Photos de 3 puces de thyristor SiC d'une taille de $3,2 \times 3,2 \text{ mm}^2$ sans (comp. #1 en haut) et avec gâchette amplificatrice (comp. #2 et #3 en bas).

3. SIMULATION ET CARACTERISATION ELECTRIQUE

3.1. Analyse du comportement avec variations de la gâchette amplificatrice

La Fig. 4 montre le circuit utilisé pour les simulations SPICE. Les figures suivantes présentent le comportement dynamique de thyristors SiC avec différentes dimensions de la gâchette amplificatrice. Comme il est expliqué en détail dans la référence [4], les thyristors AGT sont dimensionnés de façon sûr (S), adéquat (A) et non-adéquat (N). Des mesures de la mise en conduction (Fig. 5) sont comparées aux simulations SPICE (Fig. 6). Les simulations permettent d'évaluer le comportement à l'intérieur du thyristor AGT (notamment les courants du thyristor pilote I_{Pilot} et du thyristor principal I_{Main}), ce qui n'est pas possible avec le composant réel. De cette façon, il est possible de corrélérer les pics, visibles sur les courbes mesurées du courant I_G et de la tension V_{GA} de la gâchette, avec le courant passant par l'anode du thyristor pilote TP. Puisque les pics n'apparaissent que dans les courbes de thyristors correctement dimensionnés (indice S, A, voir réf. [4] pour plus de détails), ceci prouve, que dans un AGT mal dimensionné (indice N), le thyristor auxiliaire ne commute pas.

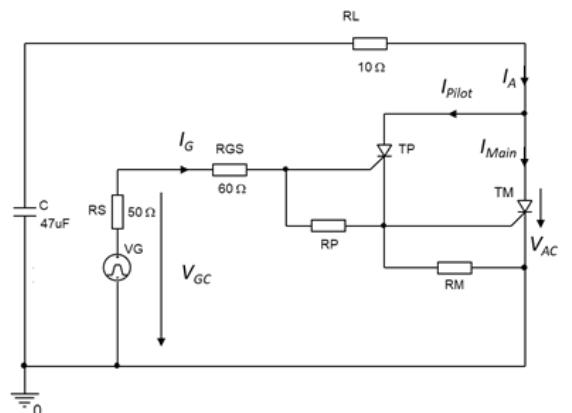


Fig. 4. Circuit de simulation SPICE avec le thyristor AGT émulé basé sur des modèles de thyristor pilote TP et principal TM.

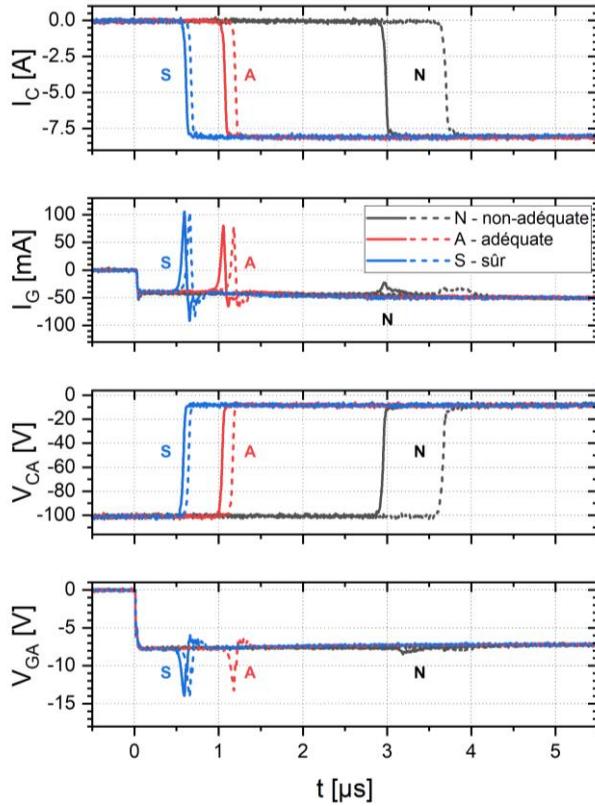


Fig. 5. Courbes de mesures de la mise en conduction de six thyristors SiC AGT (linges plaines : anode carrée, comme comp. #3, lignes pointillées : anode ronde, comme comp. #2) avec un dimensionnement sûr (S), adéquate (A) et non-adéquate (N) [4].

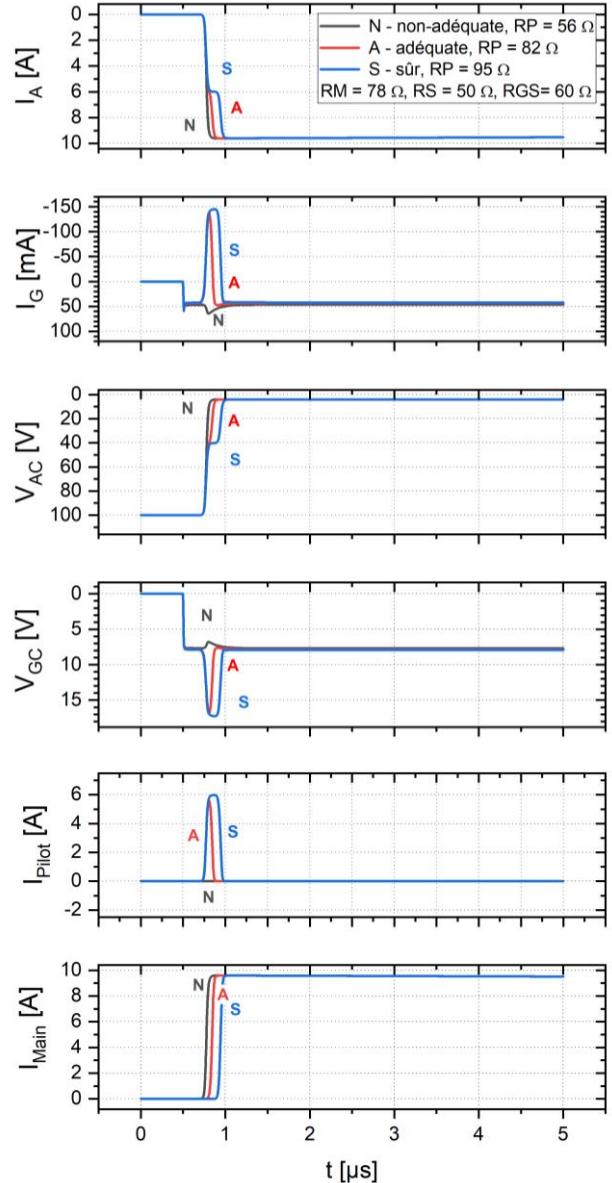


Fig. 6. Simulations pour comparer la mise en conduction de thyristors SiC AGT avec les mesures de la Fig. 5. Le signe des courbes est inversé parce que le modèle SPICE des composants TP et TM (voir Fig. 4) est basé sur un thyristor classique (gâchette du côté cathode).

3.2. Analyse du comportement de la commutation

Dans les figures suivantes des caractéristiques dynamiques des trois thyristors (Fig. 3) sont présentées. Elles montrent que les thyristors peuvent être mis en conduction jusqu'au courant nominal de $I_C = 10$ A avec un comportement conventionnel et sans dégradation visible. La durée de l'impulsion de commande et fixé à 10 μ s pour les résultats présentés ici.

La Fig. 7 montre la mise en conduction d'un thyristor avec une gâchette amplificatrice (comp. #3) en fonction du courant de la gâchette jusqu'à une valeur de $I_G = 1$ A. Le retard diminue avec le courant de gâchette. Il atteint une valeur d'environ 83 ns pour un courant de gâchette de 900 mA et une tension de 100 V. Le temps de montée du courant reste inchangé autour d'une valeur d'environ 50 ns.

Les autres composants ont été caractérisés de la même façon. Les résultats des temps de commutation extraits sont présentés sur la Fig. 8. On constate que les thyristors avec gâchette amplificatrice commutent un peu plus rapidement. Ceci peut être dû au fait que le courant du thyristor pilote, figurant comme courant de gâchette pour le thyristor principal, est plus intense que le courant de gâchette du thyristor sans gâchette amplificatrice.

La Fig. 9 montre la mise en conduction d'un thyristor avec une gâchette amplificatrice (comp. #3) en fonction de la tension initiale, jusqu'à une valeur $V_{CA,int.} = -500$ V. Le temps de montée du courant diminue fortement avec la tension appliquée. Il atteint une valeur minimale de 48 ns pour une tension de 200 V. Pour une tension de 500 V, le thyristor commute de nouveau moins rapidement. Ce fait est également visible pour les autres thyristors, y compris les thyristors de type SCR, comme le montre la Fig. 10.

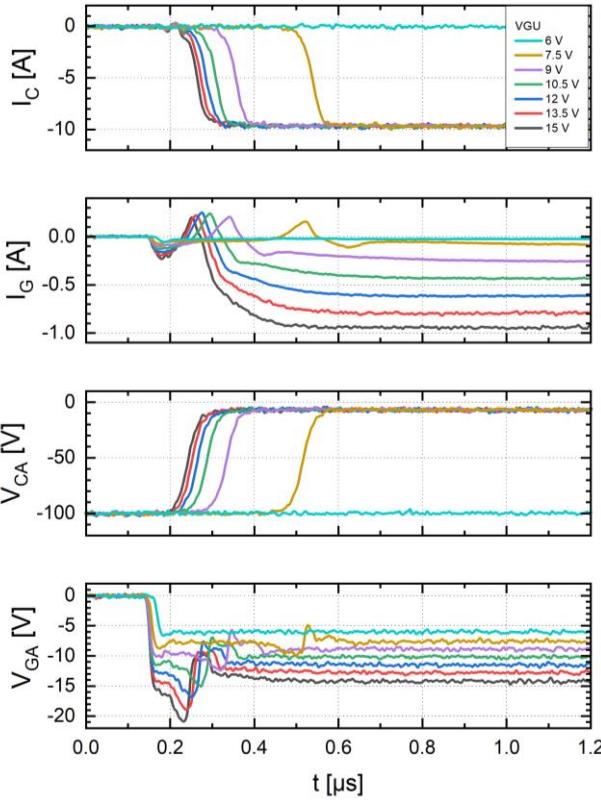


Fig. 7. Mise en conduction d'un thyristor avec une gâchette amplificatrice (comp. #3) jusqu'à un courant de gâchette $I_G = -1$ A (tension d'alimentation du driver de commande VGU comme indiquée, $R_L = 10 \Omega$, $V_{CA,init} = -100$ V).

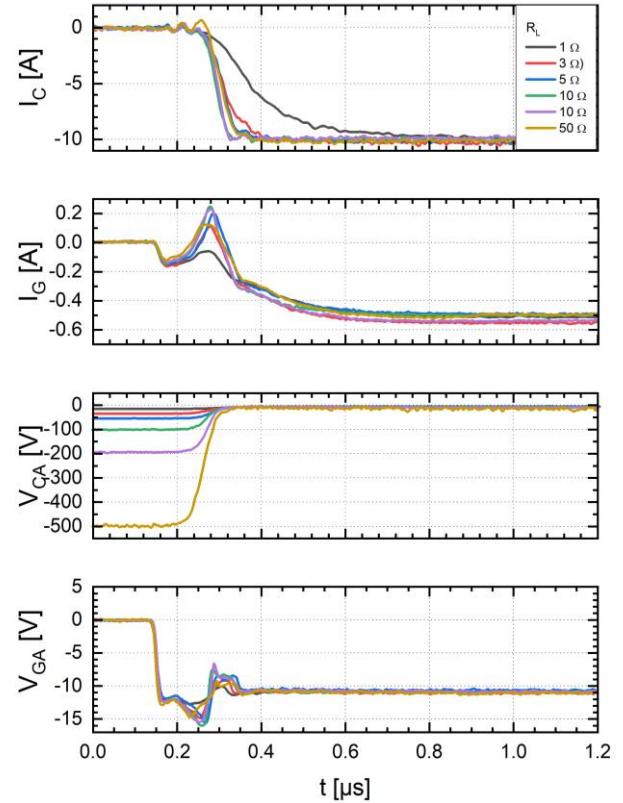


Fig. 9. Mise en conduction d'un thyristor avec une gâchette amplificatrice (comp. #3), jusqu'à une tension initiale $V_{CA,init} = -500$ V (résistance de charge R_L comme indiquée, VGU = 12 V).

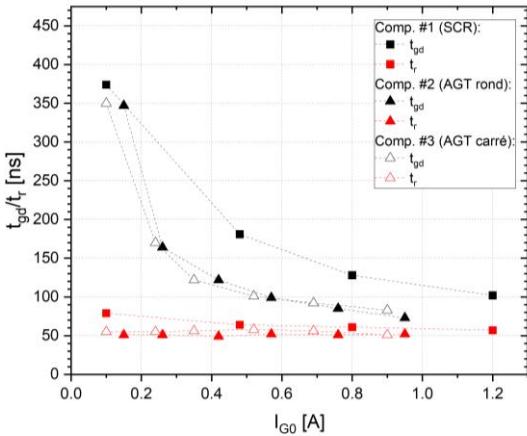


Fig. 8. Temps de delais t_{gd} et temps de montée du courant t_r des thyristors SiC en fonction du courant de gâchette I_{G0} ($V_{CA} = -100$ V).

La raison de ce comportement est inconnue pour l'instant, mais il semble être relié avec un décalage de la chute de tension (Fig. 9, tracés de V_{CA}). En plus, le courant I_C ne se décale pas de la même façon, ce qui entraîne une augmentation de la puissance de commutation, potentiellement destructif à des tensions initiales élevées.

Des mesures de commutation ont été faites jusqu'à une tension initiale de 1 kV. Pour éviter une commutation destructive, liée à une montée en courant trop forte, une bobine de $L_L = 50 \mu\text{H}$ a été rajoutée à la résistance de charge de $R_L = 10 \Omega$. Ainsi, le temps de montée du courant a été augmenté à quelques microsecondes.

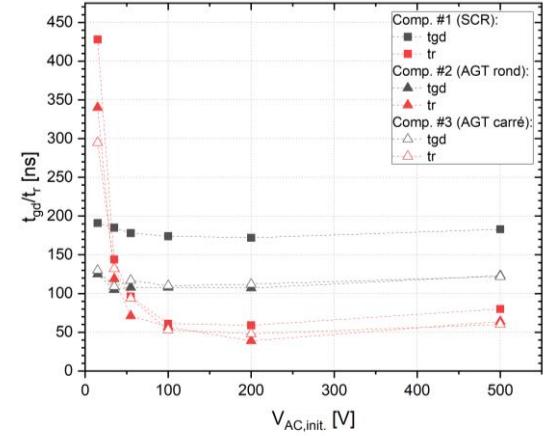


Fig. 10. Temps de delais t_{gd} et temps de montée du courant t_r des thyristors SiC en fonction de la tension initiale $V_{AC,init}$ ($I_{G0} = -0.5$ A).

La Fig. 11 montre les courbes associées pour le composant #3. Des caractéristiques identiques ont été acquises à plusieurs reprises et aussi pour les autres composants, ce qui montre que les thyristors sous test fonctionnent de façon fiable jusqu'à une tension initiale de 1 kV et un courant de 10 A. Comme discuté dans le paragraphe précédent, les tracés de la tension V_{CA} révèlent toujours un décalage important de la chute de tension. Ce décalage est probablement dû à une commutation destructive, que quelques composants ont subi avec une tension initiale de $V_{CA} = 1,2$ kV, la tension définie comme nominale pour les composants conçus.

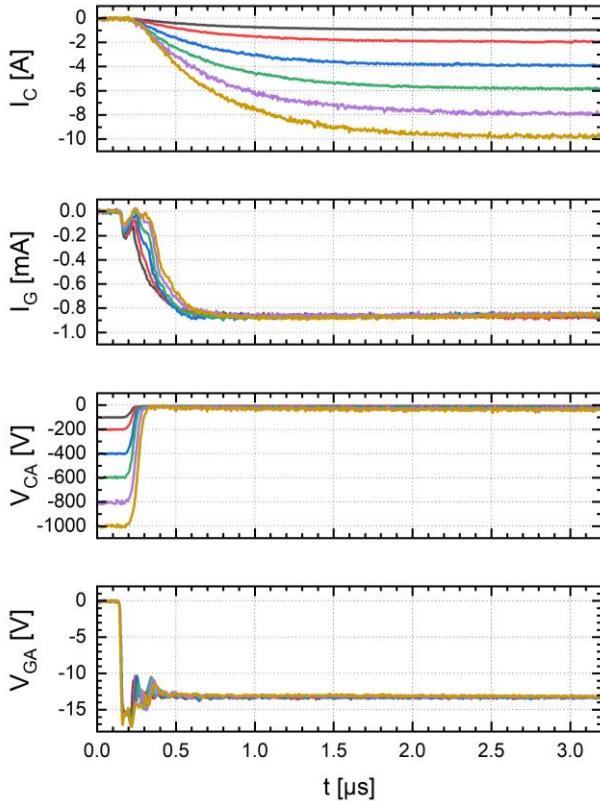


Fig.11. Mise en conduction d'un thyristor avec une gâchette amplificatrice (comp. #3) jusqu'à une tension de $V_{CA} = -1$ kV (résistance de charge $R_L = 100 \Omega$, inductance de charge $L_L = 50 \mu\text{H}$, courant de gâchette $I_G = 850$ mA).

3.3. Analyse en régime de puissance pulsée

En outre, quelques expérimentations ont été menées avec des courants crêtes beaucoup plus élevés que le courant continu nominal de 10 A. Comme le montre la Fig. 12, les thyristors sous test ont initiés des décharges capacitatives avec des ondes demi-sinusoidales de 10 kHz (courte) et 500 Hz (longue). Dans les deux cas, le courant crête maximal (400 A et 100 A, respectivement) correspond à un essai destructif, pendant lequel les connexions des fils de bonding ont été rompues. Les courants crêtes maximaux relevés ne sont pas dus aux limites du composant SiC, mais plutôt à son environnement, le packaging.

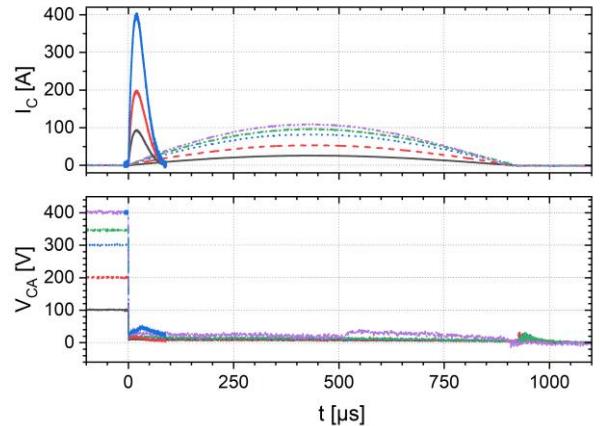


Fig. 12. Caractéristiques d'impulsions courtes (gauche) et longues (centre) de thyristors AGT, initiées par des décharges capacitatives avec des tensions anode-cathode allant de 100 V à 400 V.

4. CONCLUSIONS

En complément des résultats précédents, cette contribution traite des caractéristiques dynamiques de thyristors SiC expérimentaux, 1,2 kV, 10 A avec une structure de gâchette amplificatrice. Par ailleurs, des simulations SPICE ont permis de corrélérer le déclenchement du thyristor auxiliaire avec une structure adéquate de la gâchette amplificatrice. Ces résultats permettront donc de concevoir une structure de gâchette amplificatrice pour un thyristor optique en SiC.

5. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la DGA pour le soutien financier dans le cadre du projet AGaThE (ANR-11-ASTR-01101).

6. REFERENCES

- [1] F.J. Niedernostheide, H.J. Schulze, H.P. Felsl, T. Laska et al., « Thyristors and IGBTs with integrated self-protection functions », IET J. Circuits Devices Syst., vol.1, pp.315, 2007.
- [2] N. Dheilly, D. Planson, G. Pâques and S. Scharnholz, « Light triggered 4H-SiC thyristors with an etched guard ring assisted JTE», Solid-State Electronics, vol. 73, pp. 32-36, 2012.
- [3] S. L. Rumyantsev, M. E. Levinshtein, S.M. Shur, L. Cheng, A.K. Agarwal, and J.W. Palmour, « High current (1300 A) optical triggering of 12 kV 4H-SiC thyristor », Semicond. Sci. Technol. 28 (045016), 2013.
- [4] S. Scharnholz, L.V. Phung, D. Tournier, B. Vergne, R. Hassdorf, P. Brosselard and D. Planson, Conception de thyristors SiC permettant l'étude de l'amplification interne de l'allumage, in Proceedings of the Symposium de Génie Electrique (Cachan, France, 2014).
- [5] S. Scharnholz, R. Hassdorf, D. Bauersfeld, B. Vergne, L.V. Phung, D. Planson, Investigation of SiC thyristors with varying amplifying gate design, Mater. Sci. Forum Vol. 1062 (2022), 493-497.