

Simulation d'une structure générique RC-IGBT sans "tension de retournement" adaptée à l'intégration monolithique de cellules de commutation sur puce Si

Adem.Lale^{1,2}, A. Bourennane^{1,2}, A. El khadiry^{1,2}, F. Richardeau^{3,4}

¹CNRS, LAAS, 7 avenue du Colonel Roche, F-31400 Toulouse, France

²Univ de Toulouse, UPS, LAAS, F-31400 Toulouse, France

³Université de Toulouse; INP, UPS; LAPLACE (Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie)

ENSEEIH, 2 rue Charles Camichel, BP 7122, F-31071 Toulouse cedex 7, France

⁴CNRS; LAPLACE; F-31071 Toulouse, France

RESUME – Une structure IGBT à conduction inverse qui intègre de manière monolithique un IGBT et un thyristor auto-amorçable est proposée. La conduction en inverse est assurée par le thyristor dont la tension de retournement est faible et elle peut être modifiée en agissant sur les paramètres physiques et géométriques de la région P face arrière. Contrairement au RC-IGBT classique, cette nouvelle approche ne présente pas de snapback [1-2] en conduction direct et permet de maintenir la chute de tension à l'état passant V_{on} le plus proche possible de celui d'un IGBT classique. Le fonctionnement de notre RC-IGBT seul a été validé par des simulations physiques 2D en conduction directe et inverse. Ensuite deux structures complémentaires tri-pôles, qui utilisent la structure du RC-IGBT proposé, ont également été validées pour au final réaliser un onduleur complet. Cette approche d'intégration permet d'améliorer les performances et la fiabilité des convertisseurs de puissance.

MOTS-CLES – RC-IGBT, intégration monolithique, snapback, convertisseur, cellule de commutation

1. Introduction

L'intégration de la diode en anti-parallèle avec un IGBT unidirectionnel est nécessaire dans les applications onduleur et hacheur réversible. L'insertion d'une région N+ sur la face arrière d'un IGBT classique permet de doter l'IGBT d'une capacité de conduction en inverse [1],[2],[5],[6],[10-16]. La structure résultant de cette intégration est appelée RC-IGBT. Du fait que la même puce de silicium (du RC-IGBT) est utilisée pour la conduction inverse et directe, la structure RC-IGBT permet, par rapport à l'association en discret d'une diode et d'un IGBT, de réduire le coût du packaging et également la taille de la puce de silicium. A l'échelle du module de puissance, l'intégration de la diode permet de réduire le nombre de puces pour la réalisation du convertisseur, simplifier les interconnexions et par conséquent améliorer la fiabilité des modules. Pour améliorer davantage la fiabilité des modules, l'approche d'intégration dite multi-interrupteurs intégrant monolithiquement plusieurs structures RC-IGBT a été récemment développée [4],[7-9]. Cette approche est bien adaptée pour l'intégration de cellules de commutation. Les deux puces multi-pôles dites anode commune et cathode commune [8] obtenue par cette approche sont représentées en Figure 1 et peuvent être associées pour réaliser des convertisseurs monolithique pour applications de faible et moyenne puissance.

Parmi les inconvénients de la structure RC-IGBT classique [5-6] reportés dans la littérature, on rencontre le problème de la tension de retournement (snapback) [6] qui correspond au passage de la structure d'un mode de fonctionnement DMOS à un fonctionnement de type IGBT. Ce snapback est un inconvénient pour la mise en parallèle direct des RC-IGBT à l'état passant direct [1-2]. Pour résoudre ce problème nous proposons une structure qui intègre de manière monolithique un IGBT et un thyristor auto-amorçable en inverse. Cette structure intégrée utilise un mur P+ traversant et elle est de ce fait adaptée l'intégration de cellules de commutation de type cathode commune qui nécessite l'utilisation d'un tel mur.

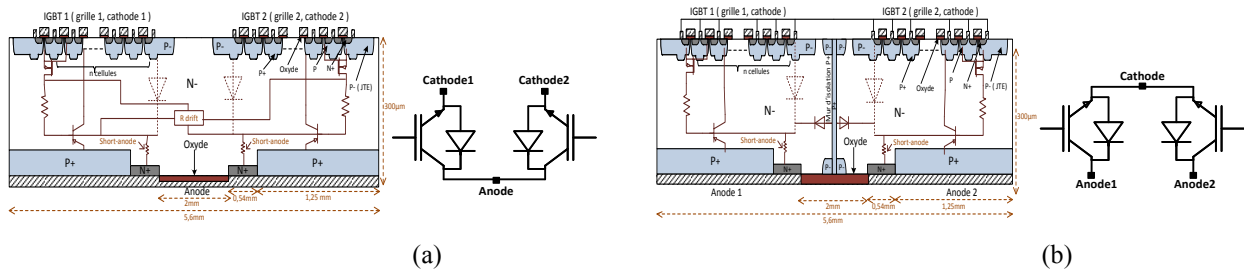


Figure 1 : Vue en coupe de deux structures multi-interrupteurs à RC-IGBT classiques : (a) aiguilleur à anode commune, (b) aiguilleur à cathode commune [3-4].

2. Architecture et fonctionnement de la structure RC-IGBT que nous proposons

La vue en coupe de la structure du RC-IGBT que nous proposons est donnée en figure 2. Cette dernière repose sur l'intégration monolithique d'un IGBT et d'un thyristor auto-amorçable. Le thyristor est composé de deux transistors bipolaires : un transistor PNP qui se trouve du côté de la cathode et un transistor NPN placé du côté de l'anode. Les sections de thyristor qui se trouvent près de des murs P⁺ sont nommées les thyristors « pilotes ». Lors de la polarisation inverse, il y a d'abord les thyristors pilotes qui s'enclenchent puis la conduction s'étend au reste de la structure. Les thyristors pilotes ont la capacité de s'enclencher pour de faibles valeurs de densité de courant d'anode et de tension anode-cathode. L'amorce du thyristor pilote se fait par la polarisation de la jonction P/N⁺ (base-émetteur) du transistor NPN. En polarisation inverse de la puce, un courant circule de la cathode vers l'anode par le biais de l'électrode flottante et du mur P⁺. Ce courant qui traverse ensuite la zone P (coté anode) va produire une chute de tension au borne de la jonction base-émetteur du transistor NPN. L'enclenchement du thyristor a lieu lorsque la jonction base-émetteur atteint une tension de 0,7V. La polarisation de cette jonction est directement liée à la résistivité et donc au dopage de la zone P.

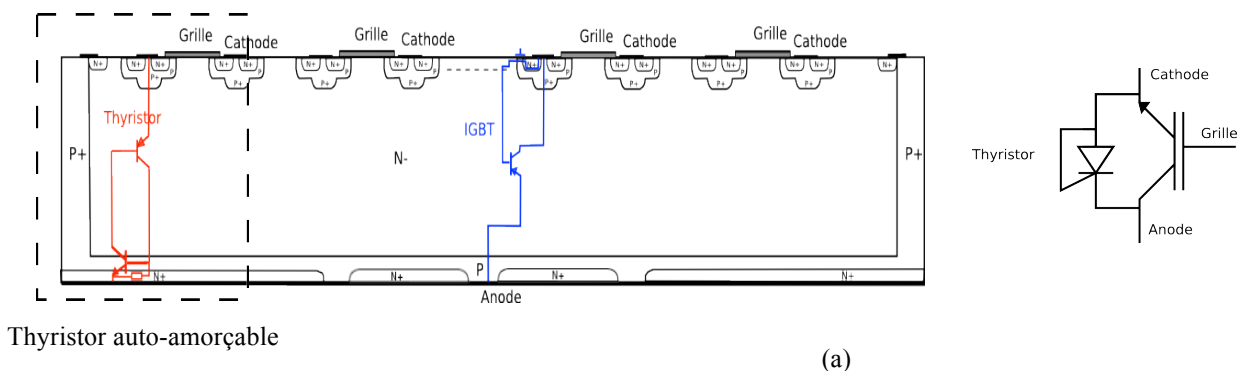


Figure 2 : (a) vue en coupe de la nouvelle structure RC-IGBT qui intègre un IGBT et un thyristor auto-amorçable, (b) symbole.

3. Structures tri-pôles : à cathode commune et à anode commune

La structure RC-IGBT que nous proposons peut être utilisée pour réaliser les structures à cathode commune et anode commune en suivant la même logique d'intégration monolithique présentée dans les travaux antérieurs des mêmes auteurs [3-4]. Les vues en coupe sont données en figure 3.

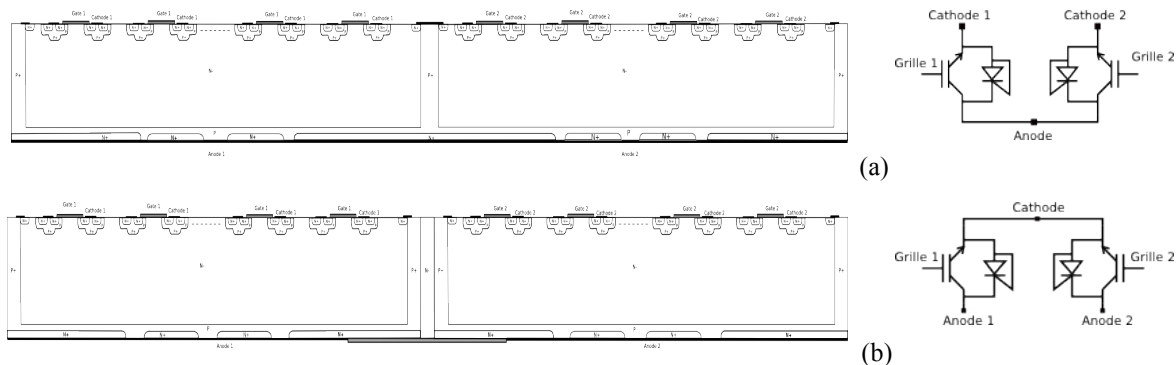


Figure 3 : vue en coupe des puces tri-pôles : (a) aiguilleur à anode commune, (b) aiguilleur à cathode commune

4. Résultats de simulations

La structure simulée a un substrat d'épaisseur de 120 μm et dopé 10^{14} at/cm³. Les paramètres technologiques de la structure simulée correspondent aux paramètres imposés par la filière IGBT flexible du LAAS. Ils seront détaillés dans le papier final.

4.1 Validation du fonctionnement du RC-IGBT

La caractéristique I(V) de la structure RC-IGBT simulée est donnée en figure 4. On constate notamment la disparition du snapback sur la caractéristique I(V) en directe (mode IGBT). Le retournement que l'on observe à l'état passant inverse correspond à l'amorçage du thyristor. Le niveau du courant d'amorçage du thyristor est faible et il peut être ajusté en modifiant la longueur de la région N⁺ face arrière ainsi que le dopage de la région P au dessus de la diffusion N⁺. En effet, plus la diffusion N⁺ face arrière est longue et la région P faiblement dopée, plus faible sera la tension de retournement.

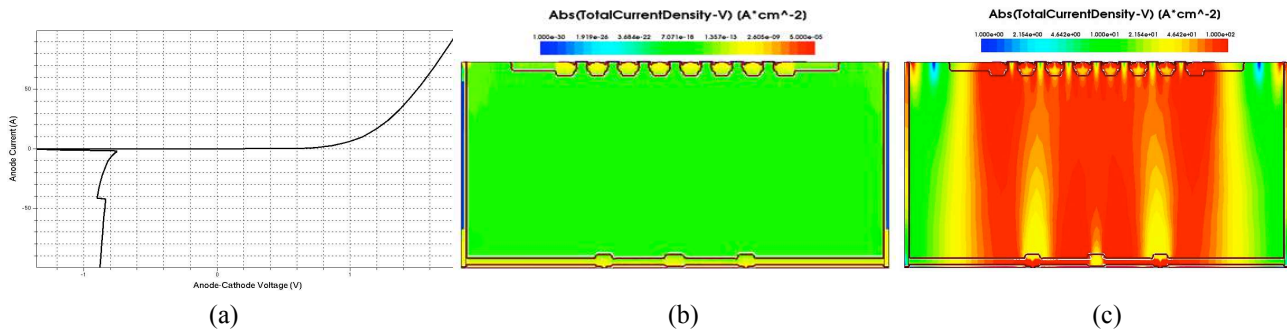


Figure 4 : (a) Caractéristique I(V) de la structure RC-IGBT, (b) Répartition des lignes de courant en direct, (c) Répartition des lignes de courant en inverse.

4.2 Validation du fonctionnement des structures tri-pôles à anode commune et cathode commune

L'association de ces dernières est déclinée en une version à anode /face arrière commune et une version à cathode / face avant commune. Les conditions de simulations sont données en figures 5 et 6.

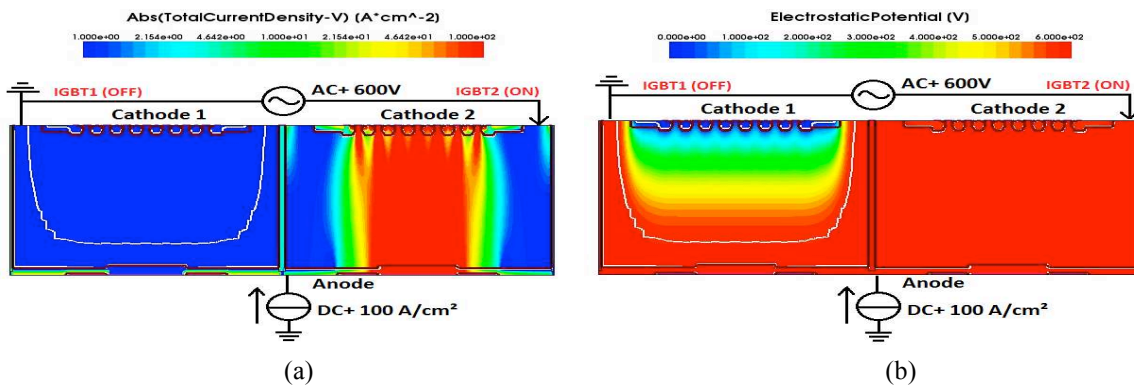


Figure 5 : (a) Répartition des lignes de courant en direct, (b) Répartition des lignes équipotentielles dans la section bloquée. (Remarque: le courant de fuite à travers la section bloquée est de l'ordre de 8 μA)

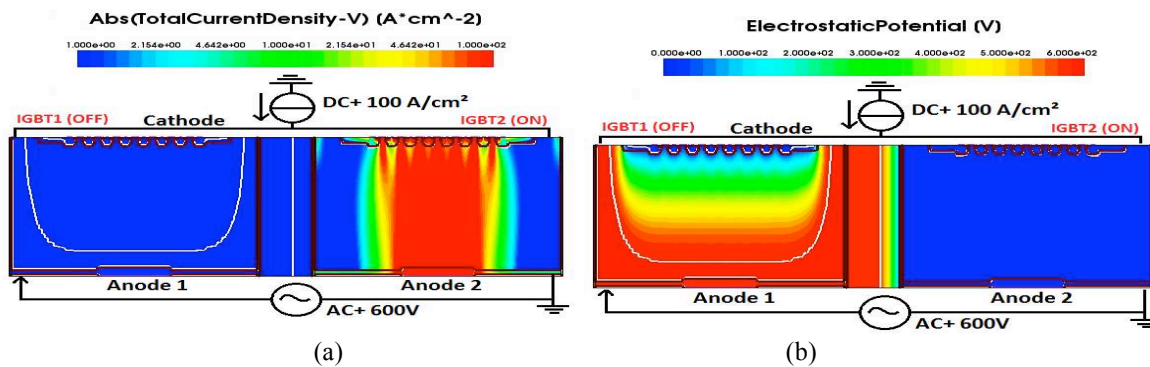


Figure 6 : (a) Répartition des lignes de courant en direct, (b) Répartition des lignes équipotentielles dans la section bloquée. (Remarque: le courant de fuite à travers la section bloquée est de l'ordre de 2 μA)

4.3 Validation du fonctionnement des deux structures dans l'application onduleur

Les puces tri-pôles à anode commune et à cathode commune ont été associées pour réaliser un onduleur (figure 7a). L'assemblage a été simulé sous Sentaurus et les résultats de simulations sont donnés en figure 7 (b).

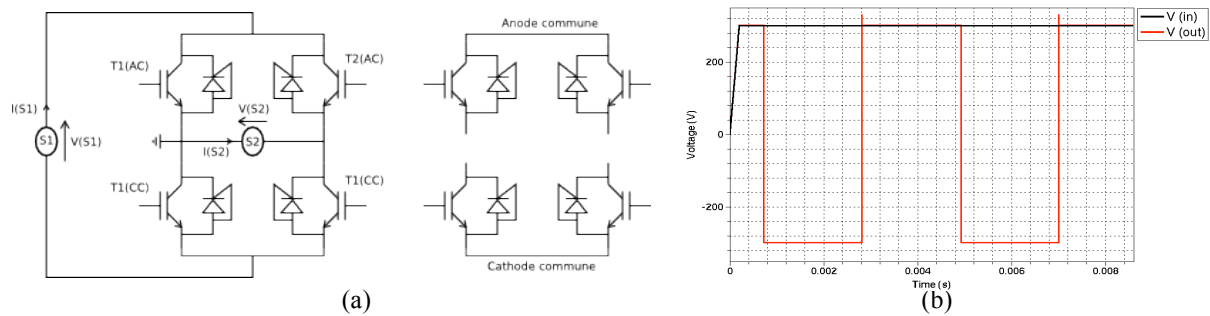


Figure 7 : (a) Schéma de l'onduleur mono-puce simulé, (b) Résultats de simulations en sortie de l'onduleur

5. Conclusion

Nous avons présenté dans cet article une nouvelle structure IGBT à conduction inverse (RC-IGBT). Cette structure intègre monolithiquement un IGBT et un thyristor auto-amorçable pour la conduction inverse. Les modes de fonctionnement de la structure en direct et en inverse ont été validés par des simulations 2D sous Sentaurus. L'avantage principal de la structure réside dans la suppression de la tension de retournement à l'état passant direct. La caractéristique $I(V)$ à l'état passant direct est donc similaire à celle d'un IGBT classique. La structure RC-IGBT a été utilisée pour concevoir des puces tri-pôles de type anode commune et cathode commune. Le fonctionnement des puces tri-pôles a été également validé par simulations. Les deux puces tri-pôles sont ensuite associées pour valider par simulations 2D leur fonctionnement dans l'application onduleur. Du point de vue technologique, l'utilisation de la structure RC-IGBT pour la réalisation de structures tri-pôles de type cathode commune et anode commune ne nécessite pas d'étape technologique supplémentaire car la puce tri-pôle de type cathode commune nécessite obligatoirement la réalisation du mur P^+ traversant. Cette brique spécifique (mur P^+) est en cours de développement dans la salle blanche du LAAS. Nous présenterons dans le papier final les performances en dynamique de la structure RC-IGBT basée sur l'intégration d'un IGBT et d'un thyristor auto-amorçable. Les performances seront comparées à celles d'un RC-IGBT conventionnel.

6. Références

- [1] L. Storasta, A. Kopta, M. Rahimo, "A comparison of charge dynamics on the reverse conducting RC-IGBT and Bi-mode Insulated Gate Transistor BiGT", ISPSD 2010, Japan.
- [2] H. Jiang et al. "A snap back suppressed Reverse-conducting IGBT with a floating p-region in trench collector", IEEE Electron device letters, vol.33, NO. 3, 2012.
- [3] A. Bourennane, M. Breil-Dupuy, F. Richardeau and J-L. Sanchez. Patent number : 11/59137, Date : Oct. 10 - 2011, by : Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Institut National Polytechnique de Toulouse. Title: "Cellule monolithique de circuit intégré et notamment cellule de commutation monolithique".
- [4] A. El Khadiry, A. Bourennane, M. Breil and F. Richardeau "Monolithically integrated switching cells suitable for high density power conversion" (ISPS'12), Prague, pp. 222-227.
- [5] H. Takahashi et al., "1200 V reverse conducting IGBT", ISPSD 2014, Kitakyushu.
- [6] A. Bourennane, F. Mura, J-L. Sanchez, F. Richardeau, M. Breil, P. Austin, Structure bidirectionnelle en courant. Revue internationale de génie électrique, pp. 553-565, RS-RIGE-10/2007.
- [7] L. Benaissa et al. "A vertical power device conductive assembly at wafer level using direct bonding technology" (ISPSD'12), Bruges, p. 77-80, 3-7 June 2012.
- [8] A. El Khadiry, A. Bourennane, M. Breil, F. Richardeau "Single - chip vertical integration approach suitable for medium power applications" (MIXDES), Gdynia, Poland.
- [9] Green, D.W.; Shankar Narayanan, E.M.; , "Fully Isolated High Side and Low Side IGBTs in Junction Isolation Technology," Power Semiconductor Devices and IC's, 2006. ISPSD 2006. IEEE International Symposium on, vol., no., pp.1-4, 4-8 June 2006 .
- [10] H. Ruthing, F. Hille, F. J. Niedernostheide, H. J. Schulze, B. Brunner, B., "600 V Reverse Conducting (RC-) IGBT for Drives Applications in Ultra-Thin Wafer Technology", ISPSD 2007, pp. 89-92.
- [11] D. Kumar, M. Sweet, K. Vershinin, L. Ngwendon, E. M. S. Narayanan, "RC-TCIGBT: A Reverse Conducting Trench Clustered IGBT", ISPSD 2007, pp. 161-164.
- [12] T. Kimmer, J. Oehmen, P. Türkes, S. Voss, "Reverse Conducting IGBT—A new Technology to Increase the Energy Efficiency of Induction Cookers", PESC 2008, pp.2284-2287.
- [13] Jae Hong Park, Methods of forming insulated gate bipolar transistors having built-in freewheeling diodes and transistors formed thereby, U.S. Pat. No. 5, 702, 961
- [14] Armin willmeroth et al. IGBT with monolithic integrated antiparallel diode, U.S. Pat. No. 7,112, 868.
- [15] H. Takahashi, Insulated Gate Transistor incorporating diode, U.S. Pat. No. 7, 154, 145.
- [16] H. Jiang et al., Low turn-off loss reverse conducting IGBT with double n-p-n electron extraction paths, the institution of engineering and technology 2012.