

Vers la caractérisation en commutation de transistors diamant à effet de champ de type p

Nicolas ROUGER, Jean-Marc BLAQUIERE, Ralph MAKHOUL, Damien RISALETTO
LAPLACE, CNRS, INPT, Université de Toulouse

RESUME – Les transistors en diamant émergent, s'appuyant sur une conduction unipolaire de trous, et donc des architectures de type pFET. Cette modification implique des contraintes supplémentaires, notamment par rapport aux potentiels des sources, dans une cellule de commutation à base de pFET. Ils ont aussi la spécificité de tensions de seuil pouvant être élevées. Nous proposons ici un circuit adapté de commande rapprochée, validé sur charge capacitive, et implémenté dans une cellule de commutation modifiée avec des transistors pFET (500 V, 1 A). Une autre spécificité est le calibre en courant réduit des premiers transistors en diamant disponibles actuellement (<1 A), ce qui, couplé à une tension de bus par contre élevée (> 300 V), n'est pas commun dans nos cartes de puissance. Un développement spécifique a été fait, afin d'être capable de piloter rapidement les transistors en diamant, tout en mesurant les faibles courants commutés mais ayant de fortes dynamiques de variations. Les cartes de commande (alimentations isolées, réglables, et commande rapprochée), ainsi que de puissance ont été validées expérimentalement. Les pertes en commutation pourront être extraites via la double impulsion et/ou la mise en opposition.

Mots-clés— Transistor diamant, caractérisation en commutation, électronique de puissance, pertes en commutation.

1. INTRODUCTION

De nombreux transistors en diamant sont désormais démontrés expérimentalement dans la littérature [1,2]. Ils s'appuient soit sur une conduction volumique, soit sur une conduction de couche, dans un gaz bidirectionnel de trous (2DHG). Pour ces derniers, une terminaison de surface hydrogénée pour le diamant est nécessaire, et le diamant n'est qu'un support à ce 2DHG présent à sa surface. Les meilleures performances ont été obtenues avec ce type de transistors [3], mais la reproductibilité, la fiabilité et l'évolutivité posent question. Pour les transistors à conduction volumique, à grilles Schottky (MESFET), MOS (MOSFET) ou pn (JFET) [1,4], ils s'appuient sur du diamant dopé au Bore (dopage type p), ayant les meilleures propriétés électriques grâce à sa haute mobilité et son énergie d'ionisation réduite, par rapport au dopage de type n. Ces transistors, de type pFET, ont des performances encourageantes, et commencent à voir leurs calibres en courant et en tension augmenter [1,4]. Sur les architectures de types JFET et MOSFET, un compromis existe entre la résistance à l'état passant et la tension de seuil [1-3]. Aussi, les transistors en diamant actuels peuvent avoir des tensions de seuil élevées, par exemple entre 30 et 50 V [5], tout en ayant des calibres en courant s'approchant désormais de 1 A [2]. Ces avancées permettent d'envisager de caractériser en régime de commutation ces premiers transistors pFET en diamant, à effet de champ, mais les dispositifs existants ne sont pas adaptés : la tension de seuil élevée n'est pas compatible avec les circuits de

commande rapprochée standard, la structure pFET impose une modification des cartes de puissance, et les capacités parasites des transistors pFET sont attendues beaucoup plus petites que leurs équivalents Si, SiC et GaN. D'autre part, mesurer des commutations rapides, avec des vitesses au-delà de plusieurs dizaines de V/ns et des tensions de mode commun élevées, tout en ayant des courants commutés faibles inférieurs à l'Ampère, pose des problèmes de mesure et d'instrumentation. Pour ces raisons et en parallèle des travaux de conception et fabrication de nouveaux transistors diamant, nous avons mis au point un circuit de commande rapprochée adapté, ainsi qu'une carte de puissance permettant d'analyser les commutations de cellules de type pFET. Les niveaux d'alimentation des cartes de commande rapprochée seront aussi variables, ajustables ici par des potentiomètres, mais sur une large plage, typiquement entre -20 V et +60 V. La figure 1 représente ainsi une cellule de commutation utilisant deux composants de puissance pFET, avec leurs commandes rapprochées, et dans une configuration double impulsion synchrone, l'inductance pouvant être en configuration High Side ou Low Side, et le roue-librage du courant assuré par la diode (externe ou interne) ou la conduction inverse du pFET. Dans la configuration de la figure 1, il est notable que le transistor High Side est le transistor actif (pilotant la commutation), avec sa référence de source fixe mais portée à la tension constante de bus. Le transistor Low Side est lui passif, mais a sa référence de source portée à une tension flottante. A ce jour et à notre connaissance, il n'y a qu'une seule caractérisation en commutation de transistor diamant faite au monde, dans [6]. Dans cet article récent [6], la tension de bus est de 30 V seulement, pour un courant de 2,5 A, avec un transistor diamant de type 2DHG à conduction latérale. Néanmoins, la montée en maturité du diamant y est indéniablement démontrée.

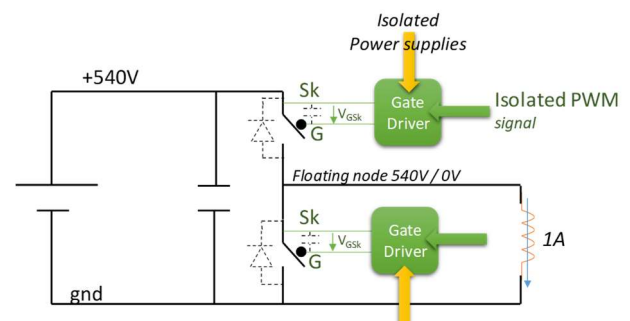


Fig. 1. Représentation d'une cellule de commutation à base de transistors de type pFET, et dans une configuration « double impulsion synchrone ».

2. DEVELOPPEMENT D'UN CIRCUIT DE COMMANDE RAPPROCHEE VARIABLE ET RAPIDE

Du point de vue de la commande rapprochée de chaque transistor diamant, la problématique principale réside dans le contrôle de la charge et décharge de leur capacité d'entrée. Cette charge de grille doit être isolée statiquement et dynamiquement, rapide, et permettre alors de passer d'un état bloqué à passant, et vice-versa. La figure 2a) présente le schéma de principe de la commande rapprochée de grille, et sa réalisation en figure 2b). Un circuit intégré haute tension a été utilisé, afin de faire l'interface depuis la sortie du récepteur optique, et de piloter 2 MOSFET « haute tension » Silicium, permettant ensuite l'amplification en courant et la charge du transistor diamant. Ce circuit intégré assure la gestion du temps mort des 2 MOSFET de pré amplification, ainsi que l'alimentation bootstrap. En ajoutant des sources de tension isolées extérieures, il est alors possible d'appliquer des tensions jusque $+45\text{ V} / -15\text{ V}$ à la grille du transistor de puissance par rapport à sa source (ici représentée à gnd dans la figure 2a), avec des courants impulsionnels au-delà de plusieurs Ampères. Les ordres logiques sont transmis par fibre optique, afin d'avoir la meilleure isolation statique et dynamique possible. L'alimentation isolée s'appuie sur des micro convertisseurs DC/DC isolés, suivis de régulateurs linéaires compatibles « haute tension », permettant de régler la plage de tension de commande et s'adapter à tout type de transistor pFET.

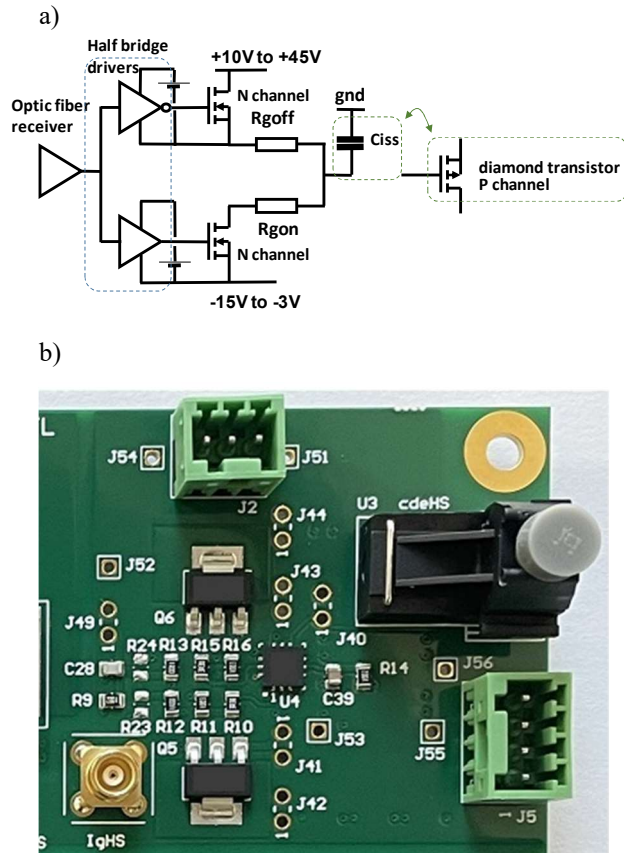


Fig. 2. Circuit de commande rapprochée dédié à la charge et décharge de transistor diamant. a) Schéma de principe. b) Photographie du circuit réalisé.

La figure 3 présente la mesure en sortie de ce circuit, sur charge capacitive représentant la capacité d'entrée extraite par

simulation de transistor pFET diamant à grille MOS [4], et avec une résistance de grille de $1\ \Omega$. Malgré une large plage de tension de pilotage, ici réglée à $+40\text{ V}$ à -5 V , la vitesse de basculement mesurée est de l'ordre de 9 V/ns , ce qui permet d'envisager des commutations rapides avec le transistor pFET diamant.

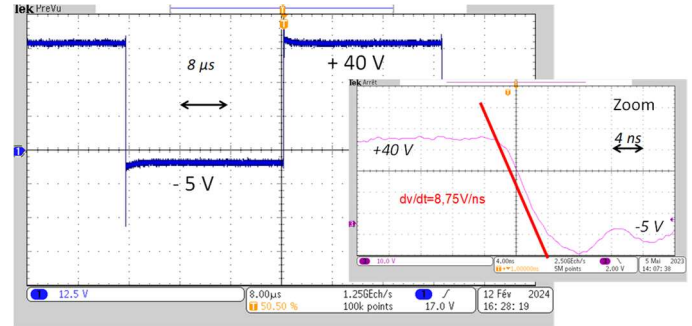


Fig. 3. Mesure de la tension aux bornes d'une capacité fixe représentant la capacité d'entrée du transistor diamant en développement (68 pF). Zoom sur « l'amorçage » qui correspondrait à une tension de grille allant de $+40\text{ V}$ à -5 V (pFET de type MOSFET à déplétion, le transistor étant passant pour une tension inférieure à la tension de seuil).

3. MISE AU POINT DU BANC EXPERIMENTAL ET VALIDATION AVEC DES PMOSFET DE PUISSANCE

3.1. Conception et réalisation des cartes de puissance, d'alimentations isolées et du banc expérimental

Le circuit de commande rapprochée étant validé, nous l'avons intégré dans une carte de puissance de type cellule de commutation pFET, à l'image de la figure 1 et avec deux transistors de puissance pFET, ainsi que deux diodes optionnelles permettant la roue libre selon les configurations Low Side actif ou High Side actif. La figure 4 présente la carte de puissance conçue, pilotée par deux fibres optiques et ayant les cartes d'alimentation isolée externes (« Adj. Vgs HS ou LS »), et la figure 5 l'ensemble du système (puissance + commande) fabriqué et mis au point.

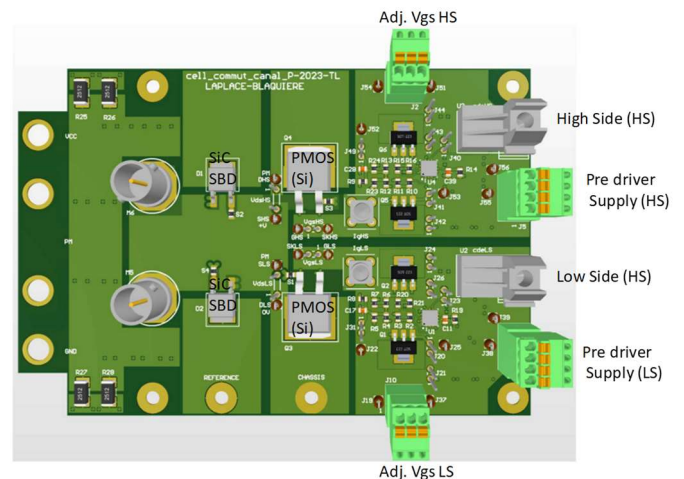


Fig. 4. Carte de puissance conçue sur PCB 4 couches, en vue de la caractérisation en commutation de transistors pFET, incluant deux commandes rapprochées identiques, et un demi-pont.

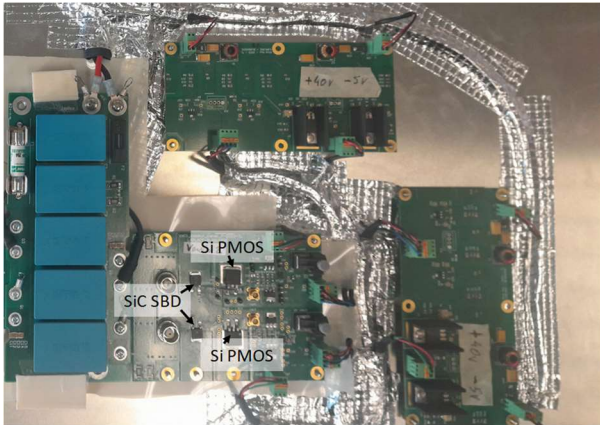


Fig. 5. Cellule de commutation pFET, avec commandes rapprochées et alimentations isolées réglables.

Par la suite, les empreintes seront adaptées pour les transistors diamant. Une première validation a été effectuée avec des composants Silicium, de type pMOSFET, de calibre 500 V et 1 A (8Ω état passant), les plus proches possibles des prototypes de transistors diamant en cours de fabrication par les partenaires du projet de recherche. La capacité d'entrée de ces transistors Si est par contre élevée (entre 270 pF et 550 pF selon la tension V_{DS}), comparativement à l'équivalent en diamant considéré. La figure 5 représente la réalisation expérimentale de cette cellule de commutation, pouvant être pMOS-Si // pMOS-Si ou bien pMOS-Si et diode Schottky SiC de faible calibre en courant. Le banc complet est présenté sur la figure 6, avec en complément une alimentation haute tension (650 V) ayant ses connectiques de sortie isolées de la terre, ainsi qu'un FPGA générant les deux ordres de commande, modulés par une carte d'émetteurs optiques. Plusieurs configurations ont été validées expérimentalement, le transistor actif ayant été câblé en high side ou low side, et la commutation pMOS/pMOS a été aussi caractérisée.

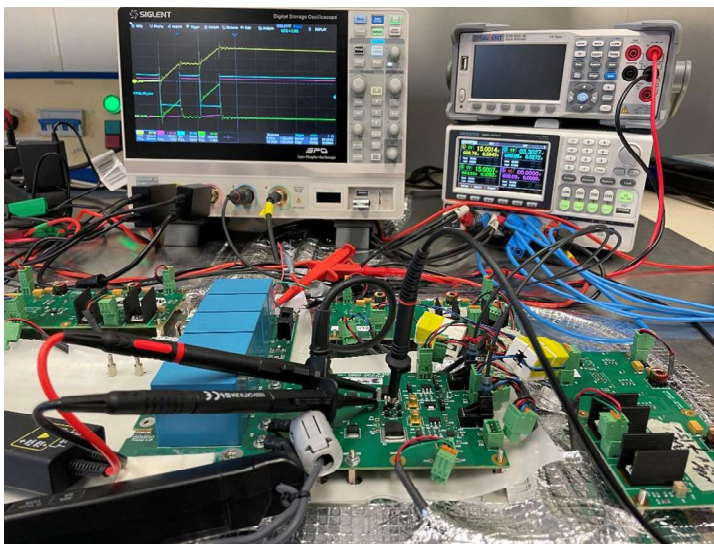


Fig. 6. Banc expérimental en vue de la mesure des commutations de cellules à base de pFET.

Afin de mettre au point et valider l'ensemble des cartes dans les essais de double impulsion, plusieurs essais ont été fait, couvrant une plage de faible courant commuté (0,1 A) à un courant plus significatif (1 A). Ces différents essais sont présentés dans les sous parties suivantes. Pour l'ensemble de ces essais, le courant dans l'inductance, le courant dans la source du transistor High Side sont mesurés, ainsi que la tension V_{ds} du

transistor High Side et sa tension V_{gs} . L'oscilloscope utilisé est un oscilloscope 350 MHz de résolution théorique de 12 bits, avec un échantillonnage de 1 GSa/s. Les sondes utilisées sont :

- Mesure du courant de l'inductance : pince hall CP1003B 5 A / 30 A 100 MHz
- Mesure différentielle V_{ds} du transistor High Side : sonde différentielle MDP1501 (150 V/ 1500 V, 150 MHz, 1,5 pF différentiel)
- Mesure V_{gs} du transistor High Side : sonde passive SP5050 (12pF, 500 MHz)
- Mesure I_{shunt} : shunt réalisé au laboratoire, à façon, et connecté à l'entrée 50 ohms de l'oscilloscope via câble BNC.

Pour tous les essais présentés, le transistor actif sera un pMOS-Si en configuration High Side (à source connectée à la tension de bus), et la diode SiC de faible calibre utilisée en diode de roue libre en Low Side. Aucun post process n'a été utilisé, ni limitation de bande passante, ni sur l'oscilloscope ni sur les sondes. Aucune fonction de moyenne n'a été utilisée non plus, il s'agit d'acquisitions uniques et brutes. Les bruits mesurés ont été néanmoins acquis préalablement à plusieurs reprises, afin d'assurer de leur reproductibilité et synchronisation avec les signaux de déclenchement.

3.2. Etudes expérimentales à faible courant commuté de 0,1 A pour une tension de bus 160 V

Pour cet essai à faible courant, une inductance à air de 1,51 mH est utilisée. Un essai typique en double impulsion est présenté sur la figure 7, validant le bon fonctionnement de cette cellule de commutation. Les pertes de commutation étant envisagées particulièrement faibles avec les pFET diamant, nous avons dupliqué la carte de puissance et les cartes d'alimentations isolées, afin d'appliquer le principe de mise en opposition de deux cellules de commutation. Ceci est présenté par exemple dans [7], dans le but de mesurer de façon très précise et indirecte, les pertes de commutation. Cependant, nous avons mesuré les énergies dissipées aux commutations via la méthode classique de la double impulsion, adaptée pour ce cahier des charges spécifique. Les figures 8 et 9 présentent ainsi le zoom sur l'amorçage et le blocage. Les vitesses maximales obtenues à l'amorçage sont de l'ordre de 14 V/ns (10V/ns moyen 10%-90%) et 0,9 A/ns, pour une énergie de 1,74 μ J. A titre de comparaison, avec un FET diamant dans [6], la vitesse moyenne mesurée était de l'ordre de 1 V/ns, soit 10 fois plus faible. Pour le blocage à faible courant, dans nos essais, les vitesses sont réduites à 2,1 V/ns, avec une commutation typique sans canal, dictée par la charge/décharge des capacités parasites.

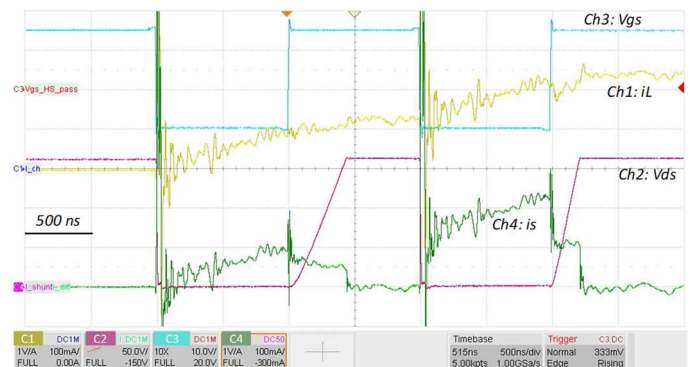


Fig. 7. Exemple de caractérisation en double impulsion pMOSFET-Si // Diode Schottky SiC, pour une tension de bus DC de 160 V et des tensions de commande de grille réglées à +15 V / -10 V.

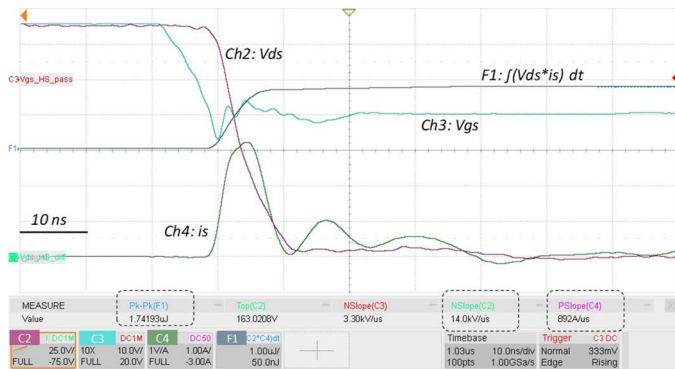


Fig. 8. Zoom sur l'amorçage 160 V 0,1 A.

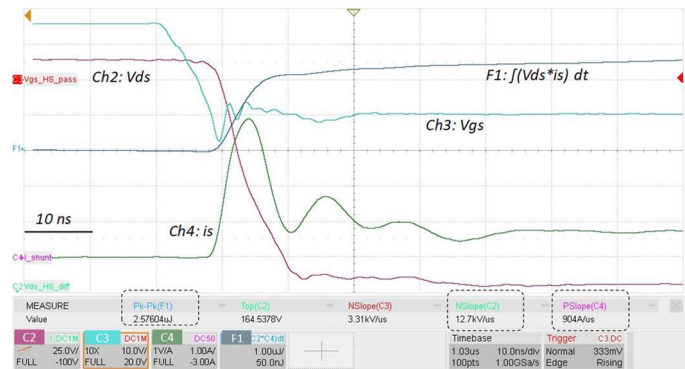


Fig. 11. Zoom sur l'amorçage 160 V 0,7 A.

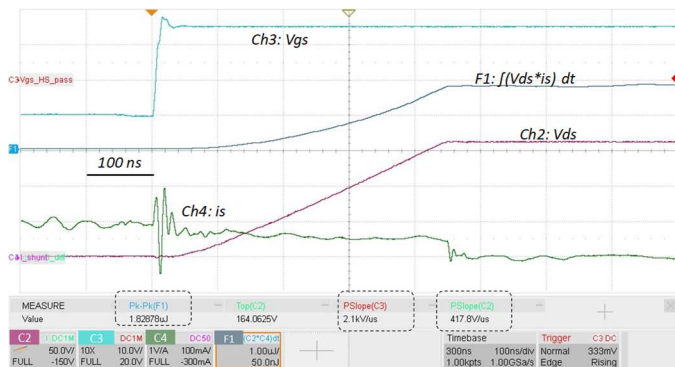


Fig. 9. Zoom sur le blocage 160 V 0,1 A.

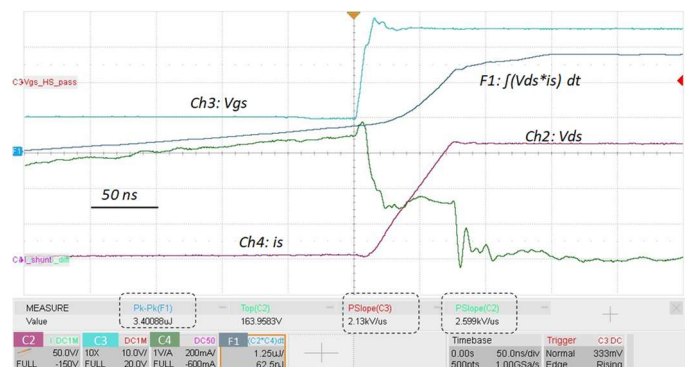


Fig. 12. Zoom sur le blocage 160 V 0,7 A.

Au-delà de ces valeurs, il est notable que malgré une mesure de courant perturbée (figure 7), il reste tout à fait possible de mesurer correctement ces commutations particulières sous faible courant.

3.3. Etudes expérimentales à courant commuté modéré de 0,7 A pour une tension de bus 160 V

Pour ces essais à courant modéré, une inductance à air de 215 μH a été réalisée et utilisée. Les résultats sont présentés sur les figures 10 à 12, montrant un impact réduit du bruit, par rapport au courant plus élevé. Les résultats sont toujours en accord avec ceux escomptés.

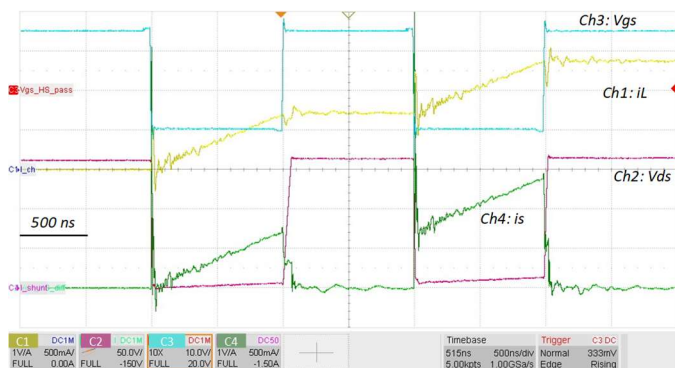


Fig. 10. Exemple de caractérisation en double impulsion pMOSFET-Si // Diode Schottky SiC, pour une tension de bus DC de 160 V et des tensions de commande de grille réglées à +15 V / -10 V.

3.4. Etudes expérimentales à courant commuté de 1 A pour une tension de bus 230 V

Pour ces essais à courant élevé par rapport au calibre en courant des pMOS utilisés, l'inductance à air de 215 μH a été utilisée. Les résultats sont présentés sur les figures 13 à 15, montrant un impact réduit du bruit, par rapport au courant plus élevé. Les résultats sont toujours en accord avec ceux escomptés.

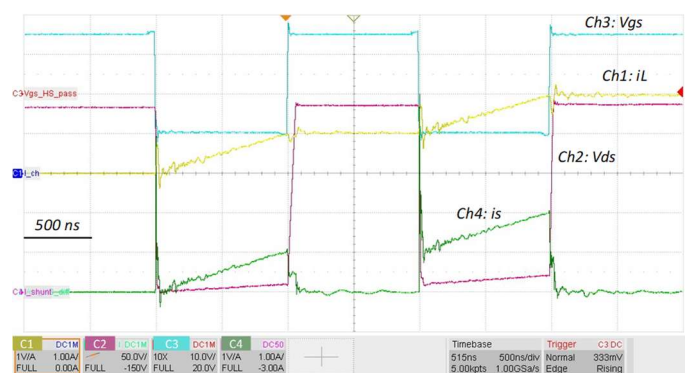


Fig. 13. Exemple de caractérisation en double impulsion pMOSFET-Si // Diode Schottky SiC, pour une tension de bus DC de 230 V et des tensions de commande de grille réglées à +15 V / -10 V.

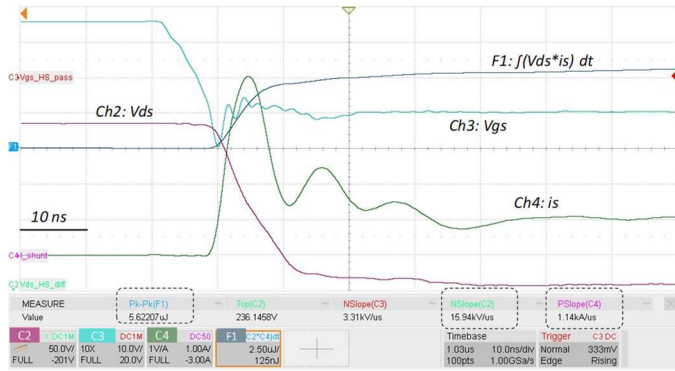


Fig. 14. Zoom sur l'amorçage 230 V 1 A.

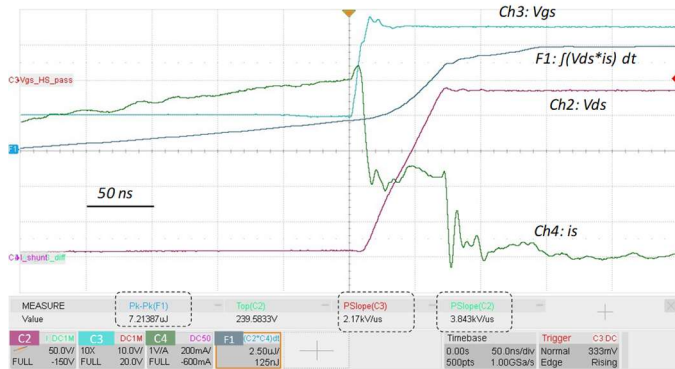


Fig. 15. Zoom sur le blocage 230 V 1 A.

4. TRAVAUX COMPLEMENTAIRES : AUTOMATISATION DE LA GENERATION DES ORDRES DE COMMANDE

De façon complémentaire et pour automatiser l'acquisition des essais, notamment la génération des ordres de commande et la synchronisation avec la mise en route du banc, un ensemble de solutions a été développé. Ici, nous partageons la génération des ordres de MLI/PWM, à la fois pour la mise au point à fréquence fixe et ajustable, que pour la génération des ordres de double impulsion. Les codes sources sont disponibles sur [8], incluant les codes C du microcontrôleur (dsPIC33CK, résolution temporelle 2,5 ns), et la gestion de l'interface graphique et des fonctions en python (GPL v3, communication série UART). Une image est présentée sur la figure 16.

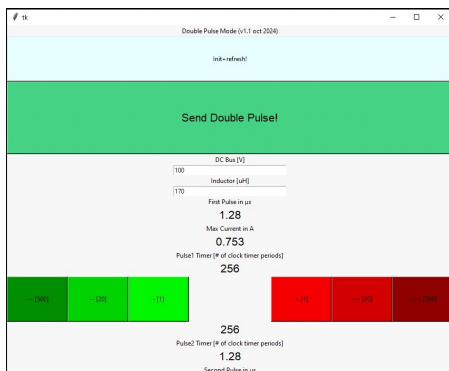


Fig. 16. Interface graphique illustrant les fonctions proposées en Python pour la génération des ordres de commande pour double impulsion.

5. CONCLUSIONS

Les transistors en diamant pour l'électronique de puissance deviennent une réalité. Une de leurs particularités est de s'appuyer sur une architecture unipolaire de type p, ainsi que des tensions de seuil pouvant être élevées. Une commande rapprochée ajustable a été mise au point, validée sur charge capacitive, puis implémentée dans une cellule de commutation à base de pMOS-Si de calibres similaires aux transistors diamant en cours de fabrication. Le bon fonctionnement des cartes de commande et de puissance a été démontré, sur une plage de tensions de bus et de courants commutés. La génération des ordres se fait désormais par un superviseur en Python, pilotant un microcontrôleur en C et via une communication série, dont les fonctions ont été partagées en science ouverte. De nombreuses perspectives sont offertes : caractériser en double impulsion et par la méthode d'opposition les pertes en commutation des transistors diamant, comparer les mesures avec les modèles circuits et fins.

6. REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet ANR PRCE LSDMOS, et en partenariat avec les entités impliquées sur ce projet (Institut Néel, et DIAMFAB). Les travaux de simulation des composants de puissance en diamant sont issus du projet DCADE. Nous remercions les partenaires de ces projets pour leur collaboration essentielle. Nous remercions aussi les stagiaires ayant contribué dans ces travaux, particulièrement Hugo CAGNOL (2019, Université de Toulouse, Laplace) et Amath Bassir FAYE (2022, Université de Toulouse, Laplace).

7. REFERENCES

- [1] N. Donato, N. Rouger, J. Pernot, G. Longobardi, F. Udrea. « Diamond power devices: state of the art, modelling, figures of merit and future perspective ». Journal of Physics D: Applied Physics, 2019, 53 (9), pp.093001. (10.1088/1361-6463/ab4eab). (hal-02377372)
- [2] D. Michez, J. Letellier, I. Hammas, J. Pernot, N.C. Rouger. « Over 50 mA current in interdigitated diamond field effect transistor ». IEEE Electron Device Letters, 2024, 45 (11), pp.2058-2061. (10.1109/LED.2024.3453504). (hal-04687646)
- [3] N. C. Saha, S. -W. Kim, T. Oishi, Y. Kawamata, K. Koyama and M. Kasu, « 345-MW/cm² 2608-V NO₂ p-Type Doped Diamond MOSFETs With an Al₂O₃ Passivation Overlayer on Heteroepitaxial Diamond », in IEEE Electron Device Letters, vol. 42, no. 6, pp. 903-906, June 2021, doi: 10.1109/LED.2021.3075687
- [4] M. Kah, D. Michez, N. C. Rouger, J. Letellier, K. Driche, et al. « Transistors en diamant à effet de champ pour l'électronique de puissance : comparaison de grilles (JFET) et amélioration de la tenue en tension (MOSFET) ». Symposium de Génie Electrique (SGE 2023), Jul 2023, Lille, France. (hal-04169088)
- [5] C. Masante, N. Rouger, J. Pernot. « Recent progress in deep-depletion diamond metal-oxide-semiconductor field-effect transistors ». Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54 (23), pp.233002. (10.1088/1361-6463/abe8fe). (hal-03287047)
- [6] Keita Takaesu et al. « Ampere-class double pulse testing of half-inch H-terminated diamond MOSFET chip ». 2025 Appl. Phys. Express 18 036502
- [7] A. Nguyen Tien, M. Petit, D. Labrousse, G. Chaplier, S. Lefebvre, « Instrumentation pour estimer les pertes de semi-conducteur par la méthode d'opposition » Symposium de Génie Electrique (SGE 2023), Jul 2023, Lille, France.
- [8] N. Rouger, « PWM generators », https://src.koda.cnrs.fr/laplace-groupe-cs/public_projects/pwmgenerators, 2025. Forge Gitlab KODA CNRS.