

Caractérisation statique d'un Si MOSFET de puissance à température cryogénique

Yanis LAÏB, Kévin BERGER, Stéphane RAËL, Jean LÉVÈQUE

Université de Lorraine, GREEN, F-54000 Nancy, France

RESUME - Pour réduire les émissions de CO₂ l'industrie aéronautique s'est tournée vers des applications supraconductrices utilisant une installation cryogénique et l'intégration de convertisseurs de puissance à température cryogénique s'est posée pour réduire les pertes. Jusqu'à présent, la majorité des tests effectués sur des interrupteurs ont été réalisés soit à l'azote liquide soit des températures supérieures à 30 K. Dans le but de déterminer la température optimale d'utilisation d'un Si-MOSFET, les mesures s'effectueront de 300 K à 10 K. Etant donné que la majeure partie des pertes d'un MOSFET provient de sa résistance $R_{DS(on)}$, nous allons caractériser cette dernière. Cette caractérisation montre alors une réduction de la résistance jusqu'à 80 K, puis une remontée de la résistance liée au gel des porteurs de charges en dessous de 80K. Finalement, la résistance semble devenir constante à très basse température, en dessous de 10 K. Deux raisons peuvent expliquer ce comportement : un changement de l'état ohmique vers l'état linéaire ou une résistance liée au pincement du canal N.

Mots-clés—Caractérisation, Cryogénie, Electronique de puissance.

1. INTRODUCTION

Pour réduire la consommation de carburant et les émissions de CO₂, l'industrie aéronautique étudie le potentiel des applications supraconductrices telles que les moteurs ou les générateurs et les câbles. Ces applications nécessitant un système cryogénique à bord pour fonctionner, la question d'une chaîne électrique cryogénique complète, à savoir : turbine - générateur - électronique de puissance - câble - électronique de puissance - moteur - fans, s'est naturellement posée afin de réduire les pertes [1]–[5].

La réduction des pertes des interrupteurs est un point clé pour l'ensemble du convertisseur de puissance et de la chaîne électrique cryogénique. Mais la température cryogénique pouvant modifier le comportement des interrupteurs en raison de la contraction des matériaux et du changement de comportement des porteurs de charge, il est important de déterminer la plage de température optimale. Si ce n'est pas possible d'utiliser le composant à cette température, alors il s'agira de trouver un compromis entre la réduction des pertes et un fonctionnement correct de l'interrupteur.

Parmi les interrupteurs généralement utilisés dans l'industrie, nous pouvons citer le MOSFET et l'IGBT. Nous avons choisi de d'abord tester un MOSFET. En effet, le choix d'un MOSFET à base de Silicium permet de mieux comprendre ce qui se passe à température cryogénique. Les pertes en régime statique du MOSFET proviennent de sa résistance drain-source $R_{DS(on)}$. Afin de vérifier si l'interrupteur est encore utilisable, l'évolution de la

tension de seuil V_{TH} avec de la température, doit également être déterminée.

Dans un premier temps, cet article décrit le composant utilisé en citant les principales grandeurs d'intérêt. Puis le système cryogénique est présenté dans sa globalité ainsi que l'instrumentation associée. Pour finir, les résultats expérimentaux issus de la caractérisation sont détaillés. Seules les caractéristiques statiques du MOSFET ont été mesurées pour l'instant.

2. PRÉSENTATION DU MOSFET STE180NE10

Le choix d'un MOSFET comme interrupteur est arbitraire, cependant le choix du composant et de sa puissance est limité par notre système. En effet, notre système de refroidissement permet d'assurer un contrôle et une homogénéité de la température du composant uniquement pour des composants de moins de ~10 cm de côté. Le MOSFET STE180NE10 de STMicroelectronics est un MOSFET de puissance, et donc avec une structure interne de puissance et non de signal (voir Fig. 1). Il possède un courant nominal de 180 A, une tension nominale de 100 V et une longueur de 38 mm. Le MOSFET STE180NE10 est donc taille et de puissance tout à fait compatible avec notre système de caractérisation.

Le Tableau 1 présente quelques caractéristiques statiques à température ambiante du composant données par le fabricant dans sa document technique [6], à savoir : $R_{DS(on)}$, V_{TH} , V_{GS} et T_j . On constate que le fabricant garantit une température de fonctionnement de la jonction jusqu'à -55 °C, soit 218 K mais pas en deçà.

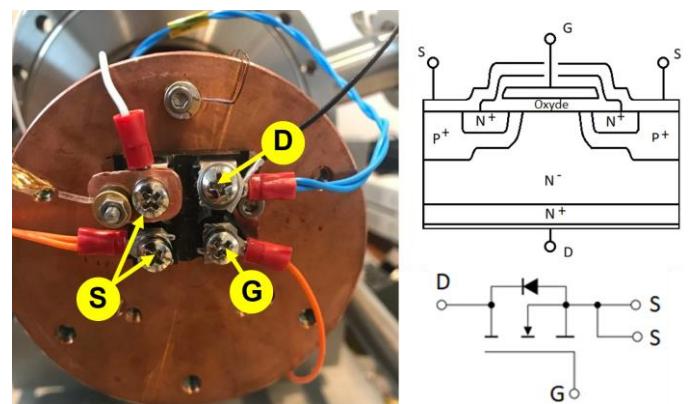


Fig. 1. Présentation du composant MOSFET mis en place sur la plaque froide du système cryogénique (à gauche), de la structure du composant (en haut à droite) et du schéma électrique du composant (en bas à droite).

Tableau 1. Caractéristiques statiques du MOSFET STE180NE10 données par le fabricant dans sa document technique [6].

Symbol	Paramètre	Conditions de test	Valeur	Unité
R_{DSon}	Static drain-source on resistance	$V_{GS} = 10 \text{ V}$, $I_D = 40 \text{ A}$	4,5	$\text{m}\Omega$
V_{TH}	Gate threshold voltage	$V_{DS} = V_{GS}$, $I_D = 250 \mu\text{A}$	2 à 4	V
V_{GS}	Gate-source voltage	-	± 20	V
T_J	Operating junction temperature	-	-55 à 150	$^{\circ}\text{C}$

Les caractéristiques statiques d'intérêt du MOSFET ayant été présentées, nous pouvons passer à la présentation du système permettant la caractérisation à température cryogénique.

3. SYSTEME DE CARACTERISATION ET INSTRUMENTATION

3.1. Présentation du système cryogénique

Les mesures en dessous de 120 K sont dites cryogéniques. Cependant, pour atteindre de telles températures sans azote ou hélium liquide il est nécessaire de contrôler les trois types d'échanges thermiques : conduction, convection, rayonnement. Pour s'émanciper de la convection, un vide de l'ordre de 10^{-4} mBar est maintenu. Les mesures montrent alors que le rayonnement est négligeable sur notre gamme de température allant de 10 à 300 K.

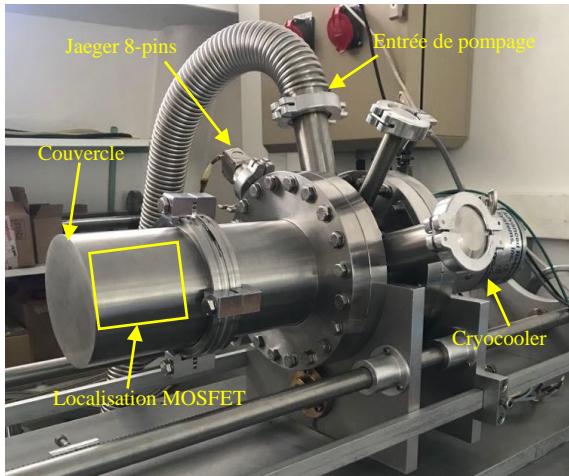


Fig. 2. Présentation du système cryogénique.

Le système cryogénique présenté sur la Fig. 2 est ensuite relié au système d'instrumentation par l'intermédiaire d'un connecteur Jaeger 8-pins.

3.2. Instrumentation

Le système d'instrumentation permet de mesurer R_{DSon} et V_{TH} . Pour mesurer R_{DSon} , il s'agit d'une mesure 4 fils classique : une source de courant injecte un courant I_D de 1 A au milliampère près, et un voltmètre relève la valeur de la tension V_{DS} au millivolt près. Par ailleurs, un dispositif dSpace permet de commander la tension V_{GS} avec une précision de l'ordre du millivolt. Pour mesurer V_{TH} , on impose la tension V_{DS} à 10 V au millivolt près par une source de tension. En faisant varier la tension V_{GS} , on obtient alors $V_{TH} = V_{GS}$ lorsque le courant I_D vaut 1 mA.

4. MESURES

Deux grandeurs seront mesurées : R_{DSon} pour déterminer la température où les pertes statiques sont minimales et V_{TH} pour s'assurer que le composant est toujours utilisable.

4.1. Mesure de la résistance R_{DSon}

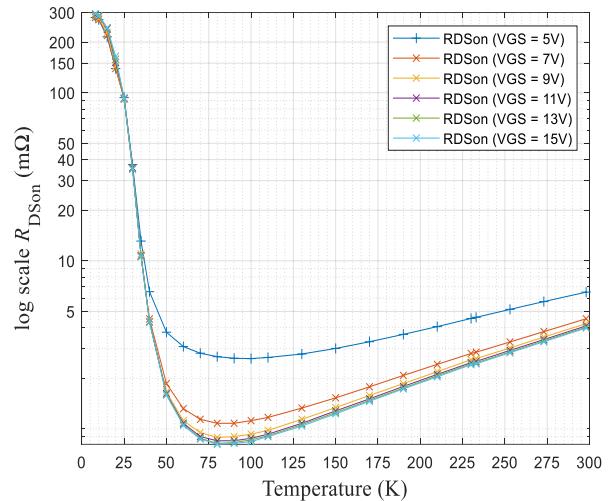


Fig. 3. Evolution de R_{DSon} avec la température pour $I_{DS} = 1 \text{ A}$ et différents V_{GS} .

Les mesures de R_{DSon} présentées sur la Fig. 3 ont été faites pour $I_{DS} = 1 \text{ A}$ et pour différentes valeurs de V_{GS} . Elles révèlent alors que la température idéale pour le Si-MOSFET est de 80 K, soit proche de la température de l'azote liquide, utilisé dans la plupart des applications supraconductrices à haute température critique. Ces mesures montrent aussi que la résistance ne tend pas vers l'infini à très basse température, mais vers une constante.

Ce comportement peut être expliqué par un changement d'état du MOSFET, de l'état Ohmique vers l'état Linéaire ($I_{DS}(V_{DS}) = \text{constante}$), ou par la résistance de pincement du canal N qui aurait une valeur minimale ou encore par l'apparition d'un effet diode Schottky lié au contact Métal-semiconducteur.

Maintenant que la température optimale a été déterminée, il faut s'assurer que le MOSFET puisse toujours fonctionner dans un système classique en mesurant notamment la tension de seuil V_{TH} .

4.2. Mesure de la tension V_{TH}

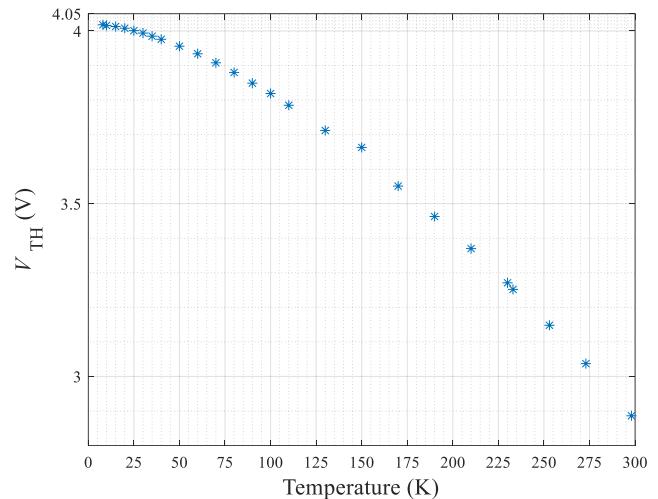


Fig. 4. Evolution de V_{TH} avec la température définie pour $I_D = 1 \text{ mA}$.

Les mesures de V_{TH} montrées sur la Fig. 4 révèlent une augmentation de la tension de seuil lorsque la température diminue. Cependant, celle-ci n'est pas significative pour

empêcher la commande d'un MOSFET dans un onduleur, la commande étant souvent alimentée en 15 V. Le Tableau 2 résume les valeurs de $R_{DS(ON)}$ et V_{TH} à 300 et 80 K.

Tableau 2. Tableau récapitulatif des valeurs de $R_{DS(ON)}$ et V_{TH} à température ambiante et « optimale » de 80 K.

Valeur	$T = 300 \text{ K}$	$T = 80 \text{ K}$	Déférence avec $T = 300 \text{ K}$
$R_{DS(ON)} @ V_{GS} = 11 \text{ V}$	4,10 mΩ	0,85 mΩ	-79%
V_{TH}	2,90 V	3,90 V	+35%

5. CONCLUSIONS

Cet article montre clairement l'intérêt d'utiliser la cryogénie dans l'électronique de puissance avec une forte réduction de la résistance $R_{DS(ON)}$ et donc des pertes associées. D'autres tests dynamiques seront également effectués, notamment la mesure des courbes $I_{DS}(V_{DS})$ pour déterminer si le MOSFET subit bien un changement de fonctionnement à très basse température. Des tests sur différents types de MOSFET (GaN et SiC) et d'autres composants sont également planifiés.

6. REMERCIEMENTS

Ce travail est en partie financé par le programme France 2030 par l'intermédiaire de Banque Publique d'Investissement (BPI) dans le cadre du projet SuperRail. Les auteurs souhaitent également exprimer leur gratitude à tous les partenaires du projet SuperRail, à savoir : SNCF Réseau, Nexans, Absolut System et Centrale Supélec de Paris-Saclay pour leurs discussions constructives et l'intérêt qu'ils portent à ce projet.

7. REFERENCES

- [1] C. Jia, « Experimental investigation of semiconductor losses in cryogenic DC-DC converters », d_ph, University of Birmingham, 2008. Consulté le: 9 décembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/161/>
- [2] K. K. Leong, A. T. Bryant, et P. A. Mawby, « Power MOSFET operation at cryogenic temperatures: Comparison between HEXFET®, MDMeshTM and CoolMOSTM », in *2010 22nd International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD)*, juin 2010, p. 209-212.
- [3] K. K. Leong, B. T. Donnellan, A. T. Bryant, et P. A. Mawby, « An investigation into the utilisation of power MOSFETs at cryogenic temperatures to achieve ultra-low power losses », in *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Atlanta, GA: IEEE, sept. 2010, p. 2214-2221. doi: 10.1109/ECCE.2010.5617827.
- [4] H. Gui et al., « Review of Power Electronics Components at Cryogenic Temperatures », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, n° 5, p. 5144-5156, mai 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2944781.
- [5] A. Beckers, F. Jazaeri, A. Grill, S. Narasimhamoorthy, B. Parvais, et C. Enz, « Physical Model of Low-Temperature to Cryogenic Threshold Voltage in MOSFETs », *IEEE J. Electron Devices Soc.*, vol. 8, p. 780-788, 2020, doi: 10.1109/JEDS.2020.2989629.
- [6] « MOSFET STE180NE10.pdf ». Consulté le: 15 décembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://docs.rs-online.com/1b3e/0900766b80478588.pdf>