



Développement de contacts innovants pour composants de puissance en SiC

PRESENTATION DU PROJET

a. Résumé du sujet de thèse

Depuis le milieu des années 1950 et la fabrication du premier transistor en silicium, ce matériau reste, aujourd'hui encore, à la base de la fabrication de l'immense majorité des composants électroniques. Néanmoins, pour la réalisation de composants devant travailler à haute température, haute fréquence ou supporter de fortes puissances, le silicium commence à montrer ses limites. En effet, des matériaux tels que le carbure de silicium (SiC), le nitrure de gallium (GaN) et le diamant possèdent des propriétés physiques et électriques nettement supérieures à celles du silicium. L'intérêt suscité par ces matériaux « alternatifs » a néanmoins été longtemps bridé par leur qualité cristalline et/ou par la taille des substrats disponibles. Mais, suite aux efforts engagés ces dernières années, en particulier pour SiC, ce frein est quasiment levé et on retrouve même des composants à base de SiC (diodes JBS et transistors MOSFET) sur le marché depuis quelques années. Néanmoins, ces premières générations de composants sont encore perfectibles et de nouvelles architectures, associées à de nouveaux procédés technologiques, doivent être développées pour en améliorer les performances.

Partant de ce constat, depuis une dizaine d'années, le GREMAN s'intéresse aux matériaux à large bande interdite (SiC et GaN), que ce soit pour la réalisation de composants de puissance ou le développement de micro-systèmes. Le GREMAN s'est spécialisé dans le développement de briques technologiques originales pour les composants de puissance, ayant trait notamment à l'intégration verticale ou aux périphéries. Ce savoir-faire, qui commence à acquérir une reconnaissance internationale, a permis au GREMAN d'être impliqué dans un projet de recherche européen H2020 qui vient d'être accepté. En effet, le projet WInSiC4AP (Wide band gap Innovative SiC for Advanced Power) a pour objectif de développer des composants innovants, fondés sur la technologie SiC (composants de puissance, drivers,

encapsulation, ...), grâce auxquels des percées significatives sont attendues dans le domaine de l'efficacité énergétique et de la densité de puissance. Coordonné par Distretto Tecnologico Sicilia Micro E Nano Sistemi SRL (Italie), le projet WInSiC4AP est un projet collaboratif européen qui réunit des partenaires en France, Allemagne, Italie, République Tchèque, ... Un des objectifs majeurs du projet est de faciliter la structuration européenne de la filière de l'électronique de puissance à base de SiC, à laquelle la France contribuera au travers des collaborations entre des industriels du domaine comme Valeo, Nexter, Apojee, APSI3D ou Zodiac Aero Electric et un partenaire académique : le GREMAN (Université de Tours). Le but ultime du projet WInSiC4AP est d'étendre et d'adapter les plateformes technologiques existantes SiC MOSFET et diodes pour les marchés de l'automobile et du rail, de l'avion électrique et de la défense, en ajustant les roadmaps aux besoins des partenaires (évolution des tensions de 1200V vers 1700V notamment) et en visant à réduire la consommation énergétique, l'encombrement et le poids des systèmes ainsi que l'amélioration de leur fiabilité au travers de nouveaux concepts architecturaux des systèmes, de technologie de packaging de puissance et de composants SiC optimisés.

L'amélioration des performances électriques et thermiques des composants SiC nécessite, entre autre, de réduire l'épaisseur des substrats utilisés. Cette démarche est néanmoins antinomique avec la volonté d'augmenter la taille des plaquettes (et donc leur épaisseur) pour réduire les coûts de revient unitaires des composants. La solution envisagée consiste donc à amincir le substrat mais, pour des raisons de maniabilité, cette action ne peut se faire qu'à la fin du procédé de réalisation des composants. Cet amincissement « post-process » n'est cependant pas sans induire de nouvelles contraintes technologiques. En effet, sur la face arrière des plaquettes, et donc sur la face amincie, réside le contact ohmique du composant, indispensable à son bon fonctionnement. Or, l'obtention d'un contact ohmique satisfaisant sur SiC nécessite, de façon classique, d'avoir recours à une étape de recuit à haute température (typiquement supérieure à 900°C). Un tel recuit, effectué à la fin du procédé de réalisation du composant, peut donc en dégrader considérablement les performances.

Un axe de recherche envisagé pour pallier ce problème est d'avoir recours à des procédés innovants pour le recuit permettant, par exemple, de ne chauffer que le métal définissant le futur contact ohmique. Une technique de recuit laser permettrait de satisfaire à cette demande et c'est l'objet central de ce sujet de thèse.

b. Intérêt par rapport aux objectifs du laboratoire

Le GREMAN est un laboratoire sous tutelle de l'Université de Tours, du CNRS et de l'INSA Centre Val de Loire, spécialisé dans les matériaux, composants et systèmes pour la conversion et la gestion de l'énergie électrique avec un objectif principal d'amélioration de l'efficacité énergétique.

Le sujet proposé est en parfaite adéquation avec la stratégie scientifique du GREMAN et s'inscrit pleinement dans une thématique du laboratoire visant à développer des composants innovants pour la microélectronique de puissance. De plus, depuis 2006, le GREMAN a développé une expertise internationalement reconnue dans le domaine des matériaux semi-conducteurs à large bande interdite, comme l'atteste par exemple plusieurs conférences invitées sur cette thématique (conférence MRS de San Francisco en 2012, conférence HeteroSiC en 2013, conférence ICSCRM en 2015 ...). Par ailleurs, le GREMAN a organisé ou organise, sur ces sujets, des évènements tels que la conférence HeteroSiC - WASMPE 2011, IMAPS ou encore le symposium L à l'E-MRS spring meeting 2016.

c. Présentation du GREMAN

Le GREMAN (UMR 7347), groupe de recherche en matériaux, microélectronique, acoustique et nanotechnologies, est un laboratoire de recherche de l'Université de Tours et du CNRS créé le 1er janvier 2012 en partenariat avec l'INSA Centre Val de Loire et en collaboration avec le Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA). Le directeur est le Pr. Marc Lethiecq. Le GREMAN est le regroupement de trois équipes qui ont vu le jour au milieu des années 1990 : le Laboratoire d'Electrodynamique des Matériaux Avancés (LEMA), le Laboratoire de Microélectronique de Puissance (LMP) et Laboratoire UltraSon Signaux et Images (LUSSI). Les activités du GREMAN sont structurées autour de 5 thèmes phare :

- matériaux et composants innovants pour la microélectronique de puissance et RF et leurs applications,
- oxydes fonctionnels pour l'efficacité énergétique : synthèse combinatoire & nano structuration,
- propriétés magnétiques et optiques des matériaux ferroïques et à corrélations électroniques,
- micro & nano systèmes piézoélectriques et capacitifs pour la transduction

- ultrasonore et la conversion d'énergie,
- méthodes et instrumentation pour la caractérisation ultrasonore de milieux complexes.

Le GREMAN en chiffres

- 42 chercheurs et enseignants-chercheurs
- 38 doctorants
- 10 chercheurs post-doctorants
- 16 personnels administratifs et techniques
- 80 à 100 publications par an, dont deux tiers dans des journaux de rang international
- 2 à 4 brevets par an
- 8 à 10 thèses soutenues par an
- 10 à 15 contrats de recherche par an (Européen, National, Industriel, Local) représentant environ 2 millions d'euros par an

Principaux moyens expérimentaux qui seront utilisés dans le cadre de la thèse

- Salle blanche 400m² de classe 100 (dépôts de métaux, hottes chimiques, ...)
- Microscopes électroniques MEB & MET, AFM, C-AFM
- Microscope Focused Ion Beam (FIB - STEM)
- Diffractomètre X (DRX)
- Laser KrF (248nm)

Tous les équipements cités ci-dessus sont disponibles sur le site du GREMAN ou sur la plateforme CERTeM (Centre d'Etudes et de Recherches Technologiques en Microélectronique). Cette dernière est une plateforme technologique localisée à Tours, dédiée au développement des composants de puissance. L'équipe du GREMAN a accès à tous les équipements qui y sont situés.

d. Profil du candidat à recruter

Le (la) candidat(e) doit être titulaire d'un diplôme de master recherche (BAC+5) dans l'une des spécialités suivantes :

- ✓ Electronique, microélectronique, nanotechnologies
- ✓ Physique appliquée

Au cours de son cursus, le (la) candidat(e) aura eu une expérience en science des matériaux. Une bonne connaissance de ce domaine est essentielle à la réussite du travail à mener dans ce projet. Une compétence complémentaire dans un des domaines suivant serait grandement appréciée :

- connaissances en techniques laser,
- connaissances en technologies microélectroniques,
- maîtrise des techniques de caractérisation physique (AFM, C-AFM, SEM, TEM, FTIR),
- expérience de travail en salle blanche.

Le (la) candidat(e) doit être intéressé par un travail en équipe car il (elle) sera un lien essentiel au groupe de travail, faisant la liaison entre des personnes venant d'horizons différents (génie des procédés, microélectronique, science des matériaux, physique ou mécanique).

De plus, cette thèse étant liée à un projet européen, il est indispensable de pouvoir communiquer en anglais avec les autres partenaires du projet.

Début : Septembre 2017

Financement : MESR/Région

Directeur de thèse :

- Daniel ALQUIER, Professeur à l'Université François Rabelais de Tours. Laboratoire GREMAN UMR 7347.

Co-encadrant de thèse :

- Jean-François Michaud, Maître de conférences à l'Université François Rabelais de Tours. Laboratoire GREMAN UMR 7347.

Références bibliographiques en relation avec le sujet de thèse proposé

R. Khazaka, **J.F. Michaud**, P. Vennéguès, **D. Alquier** and M. Portail, *Turning the undesired voids in silicon into a tool: In-situ fabrication of free-standing 3C-SiC membranes*, Applied Physics Letters 110, 081602 (2017).

J.F. Michaud, R. Khazaka, M. Portail, G. Andrä, J. Bergmann and **D. Alquier**, *Laser irradiation influence on Si/3C-SiC/Si heterostructures for subsequent 3C-SiC membrane elaboration*, MRS Advances 1(54), 3649 (2016).

R. Khazaka, **J.F. Michaud**, P. Vennéguès, L. Nguyen, **D. Alquier** and M. Portail, *On the interplay between Si(110) epilayer atomic roughness and subsequent 3C-SiC growth direction*, Journal of Applied Physics 120, 185306 (2016).

R. Khazaka, M. Grundmann, M. Portail, P. Vennéguès, **D. Alquier** and **J.F. Michaud**, *Realization of minimum number of rotational domains in heteroepitaxied Si(110) on 3C-SiC (001)*, Applied Physics Letters 108, 011608 (2016).

J.F. Michaud, M. Portail and **D. Alquier**, *3C-SiC: from electronic to MEMS devices* in *Advanced Silicon Carbide Devices and Processing*, Edited by Stephen E. Saddow and Francesco La Via, InTech, ISBN 978-953-51-2168-8. Chapitre de livre publié en 2015.

R. Khazaka, E. Bahette, M. Portail, **D. Alquier** and **J.F. Michaud**, *Toward high-quality 3C SiC membrane on a 3C-SiC pseudo-substrate*, *Materials Letters* 160, 28 (2015).

R. Khazaka, M. Portail, P. Vennéguès, **D. Alquier** and **J.F. Michaud**, *Direct insight into grains formation in the Si layer grown on 3C-SiC by chemical vapor deposition*, *Acta Materialia* 98, 336 (2015).

R. Khazaka, M. Portail, P. Vennéguès, M. Zielinski, T. Chassagne, **D. Alquier** and **J.F. Michaud**, *Silicon growth on 3C-SiC(001)/Si(001): pressure influence and thermal effect*, *Materials Science Forum* 821-823, 978 (2015).

J.F. Michaud, M. Portail, T. Chassagne, M. Zielinski and D. Alquier, *3C-SiC: new interest for MEMS devices*, *Materials Science Forum* 806, 3 (2015).

R. Boubekri, E. Cambрил, L. Couraud, L. Bernardi, A. Madouri, M. Portail, T. Chassagne, C. Moisson, M. Zielinski, S. Jiao, **J.-F. Michaud**, **D. Alquier**, J. Bouloc, L. Nony, F. Bocquet, C. Loppacher, D. Martrou and S. Gauthier, *electrothermally driven high-frequency piezoresistive SiC cantilevers for dynamic atomic force microscopy*, *Journal of Applied Physics* 116, 054304 (2014).

J.F. Michaud, X. Song, J. Biscarrat, F. Cayrel, E. Collard and **D. Alquier**, *Aluminum implantation in 4H-SiC: physical and electrical properties*, *Materials Science Forum* 740-742, 581 (2013).

J. Biscarrat, **J.F. Michaud**, E. Collard and **D. Alquier**, *ICP etching of 4H-SiC substrates*, *Materials Science Forum* 740-742, 825 (2013).

J.F. Michaud, M. Portail, T. Chassagne, M. Zielinski and **D. Alquier**, *original 3C-SiC micro-structure on a 3C-SiC pseudo-substrate*, *Microelectronic Engineering* 105, 65 (2013).

S. Jiao, **J.F. Michaud**, M. Portail, A. Madouri, T. Chassagne, M. Zielinski and **D. Alquier**, *A new approach for AFM cantilever elaboration with 3C-SiC*, *Materials Letters* 77, 54 (2012).

M. Zielinski, **J.F. Michaud**, S. Jiao, T. Chassagne, A.E. Bazin, A. Michon, M. Portail and **D. Alquier**, *Experimental observation and analytical model of the stress gradient inversion in 3C-SiC layers on silicon*, *Journal of Applied Physics* 111, 53507 (2012).

S. Jiao, M. Zielinski, **J.F. Michaud**, T. Chassagne, M. Portail and **D. Alquier**, *Detailed experimental study of mean and gradient stresses in thin 3C-SiC films performed using micromachined cantilevers*, *Materials Science Forum* 711, 84 (2012).

S. Jiao, M. Portail, **J.F. Michaud**, M. Zielinski, T. Chassagne, **D. Alquier**, *Elaboration of monocrystalline Si thin film on 3C-SiC(100)/Si epilayers by Low Pressure Chemical Vapor Deposition*, *Materials Science Forum* 711, 61 (2012).

M. Zielinski, **J.F. Michaud**, S. Jiao, T. Chassagne, A.E. Bazin, A. Michon, M. Portail and **D. Alquier**, *Analytical model of stress relaxation in 3C-SiC layers on silicon*, *Materials Science Forum* 679-680, 79 (2011).

X. Song, **J.F. Michaud**, F. Cayrel, M. Zielinski, M. Portail, T. Chassagne, E. Collard and **D. Alquier**, *Evidence of electrical activity of extended defects in 3C-SiC grown on Si*, *Applied Physics Letters* 96, 142104 (2010).

J.F. Michaud, S. Jiao, A.E. Bazin, M. Portail, T. Chassagne, M. Zielinski and **D. Alquier**, *Micromachining of thin 3C-SiC films for mechanical properties investigation*, *Présentation orale, MRS Spring Meeting, San Francisco (USA)*, 5-10 Avril 2010, *Materials Research Society Symposium Proceedings* 1246, 213 (2010).

Conférences invitées

D. Alquier, M. Portail, R. Khazaka, M. Zielinski, T. Chassagne and **J.F. Michaud**, *Novel 3C-SiC microstructure for MEMS applications*, 16th International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM), Giardini Naxos (Italie), 4-9 Octobre 2015.

M. Portail, **J.F. Michaud**, **D. Alquier**, A. Michon, T. Chassagne, M. Zielinski and Y. Cordier, *Potentialities of SiC/Si heterostructures for MEMS applications*, HETECH, Glasgow (Scotland), 9-11 Septembre 2013.

J.F. Michaud, M. Portail, T. Chassagne, M. Zielinski and **D. Alquier**, *3C-SiC: new interest for MEMS devices*, HeteroSiC – WASMPE'13, Nice (France), 17-19 Juin 2013.

D. Alquier, **J.F. Michaud**, S. Jiao, M. Portail, M. Zielinski and T. Chassagne, *3C-SiC: a material for MEMS applications*, Materials Research Society Symposium H, San Francisco (USA), 9-13 Avril 2012.