



HAL
open science

Prospective sur les composants de puissance verticaux grand gap (Carbure de Silicium et Diamant) et leurs applications

Michel Mermet-Guyennet, Hervé Morel, Dominique Planson, Henri Schneider,
Jocelyn Achard

► **To cite this version:**

Michel Mermet-Guyennet, Hervé Morel, Dominique Planson, Henri Schneider, Jocelyn Achard. Prospective sur les composants de puissance verticaux grand gap (Carbure de Silicium et Diamant) et leurs applications. 12e EPF (Electronique de Puissance du Futur), Jul 2008, Tours, France. hal-04606571

HAL Id: hal-04606571

<https://hal.science/hal-04606571>

Submitted on 10 Jun 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Prospective sur les composants de puissance verticaux grand gap (Carbure de Silicium et Diamant) et leurs applications

Michel MERMET-GUYENNET ¹, Hervé MOREL ², Dominique PLANSON ², Henri SCHNEIDER ³,
Jocelyn ACHARD ⁴

¹ ALSTOM Transport – Power Electronics Associated Research Laboratory
Rue du Docteur Guinier – BP4 – 65600 Séméac – France

² AMPERE INSA-Lyon, UMR 5005 CNRS, Bât. Léonard de Vinci, 20 av. Albert Einstein, F-69621
Villeurbanne

³ Laboratoire LAPLACE, 118 Route de Narbonne, 31077 Toulouse

⁴ Laboratoire LIMHP, 99 Av. Jean Baptiste Clément, 93430 Villetaneuse

Les composants de puissance grand-gap sont un grand sujet de recherche depuis de nombreuses années, toutefois le principal frein à leur développement a été la disponibilité et la qualité des substrats de base. Aujourd'hui, les substrats Carbure de Silicium commencent à être disponibles industriellement avec des taux de défauts acceptables.

Concernant le diamant, la technologie de croissance CVD permet à ce jour d'obtenir des substrats, certes petits, mais d'une qualité permettant d'envisager des dispositifs semi-conducteurs.

Le papier présenté ici abordera les points suivants :

- **Analyse des limites des composants de type IGBT silicium** : Aujourd'hui, les composants silicium haute tension (>1200V) avec des courants nominaux forts (plusieurs centaines d'ampère) sont majoritairement basés sur la technologie IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Ces composants sont mis en parallèle dans des boîtiers pour atteindre les courants nominaux nécessaires aux applications des utilisateurs.

La limitation en tension des composants actuels provient principalement du dopage de la base n qui doit être le plus bas possible ; Ainsi, on atteint la limite en température lorsque le nombre de porteurs intrinsèques est égal au nombre de porteurs de la base n. A titre d'exemple, un dopage de base $n=6.5 \times 10^{12} / \text{cm}^3$ donne une température limite de 125°C, ce dopage est nécessaire pour avoir un bon compromis des caractéristiques statiques pour un IGBT 6,5 kV. L'autre limite correspond aux caractéristiques dynamiques de ces composants : les pertes en commutation deviennent très importantes pour les composants silicium haute tension. En effet, de fortes pertes instantanées à la mise en conduction et au blocage créent des échauffements locaux au niveau des canaux du semi-conducteur limitant les fréquences de fonctionnement des composants ; à titre d'exemple un composant 6,5 kV avec un courant nominal de 600A génère 15 joules sur un temps de 0,4 microsecondes soit 37,5 MW au point $V_{ce} = 3600V$, $I_c = 1200A$, $T_j = 125^\circ\text{C}$ (Point maximum de la Reverse Bias Safe Operating Area).

Pour les besoins en tension au-delà de 6,5 kV, un composant de type IGCT est proposé par certains constructeurs, ce composant qui est une adaptation du concept de thyristor, mais amélioré en ce qui concerne la commande, permet d'atteindre des tensions de l'ordre de 10kV. Ce composant est présenté sous forme de Press-Pack et offre des caractéristiques dynamiques limitées.

- **Avantage des composants grand-gap par rapport aux applications forte tension et fort courant** :

l'orientation en terme d'application des composants grand gap permettra des sauts technologiques très importants sur les trois caractéristiques suivantes :

- Haute température : le band-gap très important permet des fonctionnements pour des températures allant jusqu'à 600°C, toutefois, il paraît difficile d'aller au delà de 400°C pour des risques de fiabilité, dû au packaging notamment
- Haute tension : les propriétés du cristal permettent d'envisager des composants avec des tensions de blocage de plusieurs dizaines de kV. L'environnement du composant devra être complètement redéfini car les solutions actuelles ne peuvent convenir avec un niveau de fiabilité acceptable.
- Forte énergie : le couplage des hautes tensions, forts courants avec des transitoires de l'ordre de la nanoseconde permettront d'adresser les applications qui demandent des énergies transitoires de 100kJ à 1 MJ.

Les segments de marché seront ensuite adressés en fonction d'une de ces trois propriétés,

Applications industrielles : Haute température

Applications Ferroviaires : Haute température et haute tension

Applications Aéronautiques : Haute température

Applications Militaires : Haute température, haute tension et forte énergie

Applications Navales : Haute température, haute tension

Deux cas d'application spécifique au ferroviaire seront détaillés : Onduleur tout Carbure de Silicium et Transformateur Moyenne Fréquence

Verrous technologiques pour établir des filières grand gap viables :

Bien que les travaux au niveau mondial soient très avancés au niveau Carbure de Silicium, des initiatives sur ces domaines ont été lancées en France et la présentation détaillera les verrous à traiter au niveau Carbure de Silicium et Diamant.

Le programme sur le diamant (DIAMONIX) démarré début 2008 propose de traiter les verrous technologiques suivants :

1. Les substrats

Il n'existe pas de substrats de grandes tailles pour la croissance homoépitaxiale de diamant monocristallin. Cependant les monocristaux obtenus par les techniques HPHT pourraient permettre de réaliser des composants d'électronique de puissance à l'unité.

2. Le dopage

Le développement d'un composant tel que la diode PiN toute en diamant dans le cadre d'applications en électronique de puissance impose de travailler en volume. Aussi, de manière à assurer la tenue mécanique du composant, une couche épaisse (>200µm) fortement dopée en bore doit être réalisée. Ce sera le substrat P⁺, base de toutes les réalisations de composants.

La structure PiN sera alors réalisée par épitaxie d'une couche intrinsèque ou faiblement dopée suivi d'une épitaxie de couche N. Ce dernier point est particulièrement délicat sur l'orientation 100 des substrats les plus larges et constitue un réel verrou technologique.

Substrats P⁺ :

Bien que ce type de dopage soit parfaitement maîtrisé sur des couches relativement minces (inférieures à quelques micromètres), il n'en est pas de même pour les films épais. En effet, l'incorporation de bore dépend fortement, d'une part de l'orientation de la face cristalline en regard de la phase plasma et d'autre part, de la présence éventuelle de secteurs de croissance sur la face initiale du cristal. Une difficulté majeure concernera

donc le choix et la préparation des substrats de manière à initier la croissance sur une surface constituée d'une seule et unique orientation et exempte de défauts. Par ailleurs, la résistance série de cette couche épaisse devra être négligeable de manière à limiter au mieux la chute de tension dans le substrat. Par conséquent, le dopage bore devra être suffisant (quelques 10^{20} cm^{-3}) pour atteindre la transition métallique, cette dernière caractéristique renforçant encore la difficulté d'obtention d'un dopage homogène sur une épaisseur conséquente. Par ailleurs, l'espèce précurseur en phase gazeuse plasma responsable majoritairement du dopage n'a pas encore été identifiée. Des travaux dans ce sens doivent compléter les résultats obtenus très récemment dans le cadre d'une thèse (M. Rayar (2006)). Une fois l'espèce identifiée, une étude du plasma et de l'interface plasma / surface par des moyens de spectroscopie et de modélisation devrait permettre d'accroître le taux d'incorporation du bore à la surface du diamant en croissance. Une étude « croissance cristalline » sous ces conditions plasma optimisées avec des substrats triés soigneusement devrait permettre de maîtriser l'homogénéité dans les films.

Epitaxie de type N :

Le dopage de type n du diamant orienté (100) est un vrai défi. A ce jour, seul un laboratoire japonais (AIST – Tsukuba, Japon) a publié des résultats sur l'incorporation de phosphore électriquement actif dans des films minces de diamant homoépitaxié par MPCVD (microwave enhanced chemical vapor deposition) [1]. Un des principaux verrous consiste à trouver les conditions de croissance qui permettent d'incorporer des concentrations élevées de phosphore dans le diamant monocristallin homoépitaxié et orienté (100) tout en :

- gardant une bonne morphologie de surface,
- minimisant les défauts structuraux et les impuretés compensatrices pour obtenir du phosphore optiquement et électriquement actif,
- minimisant les défauts limitant la mobilité des porteurs.

3. Le polissage

Le polissage est une étape technologique indispensable à la réalisation de composants électroniques de qualité. La résistance mécanique du diamant rend cette étape particulièrement délicate. Les polissages bien connus des joailliers ne sont absolument pas adaptés à l'électronique, les rugosités sont supérieures à 5 nm et il apparaît une zone écrouie sur une épaisseur importante (typ. 200 nm). A ce jour, seule la société Element six semble disposer d'un polissage de qualité électronique.

4. Les contacts

La réalisation de composants électroniques sur diamant nécessite la maîtrise des contacts électriques. Ces contacts jouent un rôle prépondérant dans les performances des composants. Le dépôt d'un métal sur du diamant peu dopé présentera un caractère redresseur (barrière Schottky).

La réalisation de contacts ohmiques qui permettent de collecter l'ensemble des charges en mouvement dans le matériau nécessitera un fort dopage sous contact. Ainsi le contact ohmique sur couche de type P⁺ est réalisé par évaporation d'un métal le plus souvent réfractaire qui présente l'avantage de former un carbure à l'interface ce qui améliore la qualité du contact et favorise la tenue mécanique. Des résistivités de contact de $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ont été reportées ce qui permet la réalisation de composants performants.

Dans l'optique de développer des dispositifs électroniques à base de diamant de type n, la réalisation de contacts ohmiques sur ce type de dopage est essentielle. Or, à ce jour aucune étude spécifique n'a été menée sur le sujet. Toutefois, la voie la plus commune est celle du dépôt métallique Pt/Au ou Pt/Ni/Au qui limite les mesures de transport à des films de quelques $5 \times 10^{16} \text{ P/cm}^3$ et davantage. Une autre possibilité consiste à

¹ Kato et al, Applied Physics Letters 86 (2005)

effectuer une surcroissance localisée d'un film dopé n^+ qui a l'avantage de permettre les mesures de transport sur des films très faiblement dopés ($<5 \times 10^{16} \text{ P/cm}^3$).

En ce qui concerne les contacts Schottky, le dépôt d'un métal sur le diamant, semiconducteur à large bande interdite, devrait faire apparaître une hauteur de barrière indépendante de la nature du métal de l'ordre de 2,3 eV. La barrière est en fait abaissée à 1,8 eV à cause de l'état de surface.

5. Le packaging

Pour exploiter pleinement les propriétés du diamant il faudrait être capable de travailler à haute température ($>200^\circ\text{C}$) ce qui aujourd'hui pose de nouveaux problèmes technologiques. En effet tous les polymères et matériaux standard utilisés pour le packaging des composants d'électronique sont inutilisables à ces températures.