

# Estado de la tecnología de dispositivos SiC y GaN

A. Matallana, J. Andreu, I. Kortabarria, E. Planas, I. Martínez de Alegría

Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)

e-mail: asier.matallana@ehu.es

http://det.bi.ehu.es/~apert

**Resumen**— Los dispositivos de silicio son fundamentales en los convertidores de potencia. Aunque existen nuevos desarrollos con este material, muchas veces el silicio tiene límites físicos que son difíciles de superar. Por esta razón, han aparecido nuevos semiconductores conocidos como *wide bandgap* (WBG). Estos proporcionan una mejora sustancial en comparación con el silicio. Sin embargo, a día de hoy, necesitan un mayor grado de desarrollo. Estos nuevos dispositivos presentan menores pérdidas, trabajan en rangos de 1200-1700 V y 50-100 A, con resistencias de conducción del orden de los  $m\Omega$  y cargas del dispositivo de  $nC$  con temperaturas de 150-175°C con grandes perspectivas de mejora. Este artículo proporciona una revisión tecnológica de los dispositivos de electrónica de potencia de SiC y GaN con sus propiedades más características y una revisión general de los dispositivos existentes en el mercado.

**Palabras Clave**— SiC, GaN, *wide bandgap*, diodo, BJT, JFET, MOSFET, IGBT, HEMT, HFET, cascode, GIT.

## I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la tecnología de los dispositivos de potencia de silicio (Si), especialmente los IGBTs, tiene un gran nivel de desarrollado empleando diferentes arquitecturas para resolver los problemas que plantean las aplicaciones de potencia. Los fabricantes tratan de reducir las pérdidas, tanto estáticas como dinámicas, al igual que intentan obtener dispositivos más robustos frente a los problemas de sobrecorriente durante el apagado ( $I_{RR}$ ) y mejorar la capacidad de cortocircuito [1]. Una solución adoptada para mejorar el rendimiento de los dispositivos de silicio es diseñar nuevas arquitecturas. Esta filosofía se aplica en la tecnología de los IGBTs de silicio dividiéndola en dos principales arquitecturas (figura 1): compuerta planar [2] y compuerta *trench* [3]. Las primeras tecnologías desarrolladas fueron la *punch through* (PT) [4] y la *non punch through* (NPT) [5]. De la fusión de los conceptos de ambas tecnologías surgió la arquitectura field stop (FS) [6] y sus derivados según el fabricante (*soft punch through* (SPT) para ABB y *light punch through* (LPT) para Mitsubishi). Por otro lado, el desarrollo de la tecnología *trench* fue un punto de inflexión, ya que dicha tecnología se podía implementar sobre las arquitecturas planares dando lugar a arquitecturas avanzadas como es el caso de la *trench field stop* (*trench* FS) [7]. Sin embargo, en ocasiones, todos estos avances en la tecnología del silicio no son suficientes para las aplicaciones de potencia.

La tecnología de los semiconductores de potencia de silicio tiene algunos límites relacionados con el material del sustrato o la calidad de su epitaxia. Estos problemas deben ser abordados para mejorar las aplicaciones. Una forma es, como ya se ha visto, mediante el desarrollo de nuevas arquitecturas avanzadas. Pero existe otra manera, que es el uso de nuevos materiales como el carburo de silicio (SiC) y el nitruro de galio (GaN) que presentan mejoras respecto al silicio. Estos nuevos materiales intentan solucionar algunos de los problemas típicos que tiene el silicio como el voltaje de bloqueo, la temperatura de operación y la frecuencia de conmutación. En el futuro,

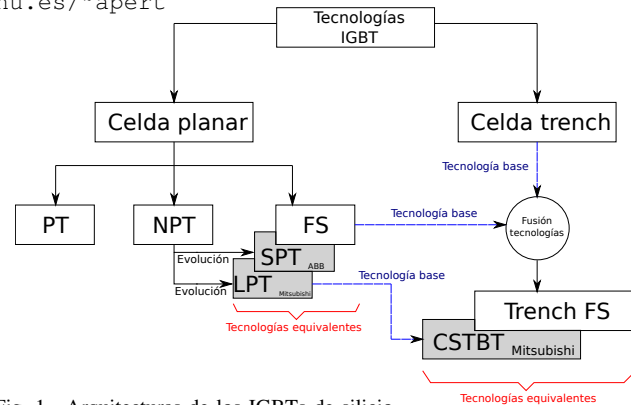


Fig. 1. Arquitecturas de los IGBTs de silicio.

los dispositivos de GaN tendrán un mejor comportamiento en altas tensiones y corrientes que el SiC, ya que se encuentran en pleno proceso de desarrollo, pero a corto plazo el SiC es mejor opción que el GaN, ya que sus propiedades y el proceso de producción tiene un mayor grado de madurez. Además, ambas tecnologías presentan buenos comportamientos térmicos, lo que permite mejorar y hacer más sencillo el proceso de paralelización de los semiconductores.

El propósito de este artículo es dar una visión de las características, rangos, estado de la tecnología y otros factores de los distintos dispositivos de potencia fabricados con SiC y GaN. El artículo se centra en aquellos semiconductores que están siendo vendidos o serán comercializados. Asimismo, se explica las ventajas y desventajas de los dispositivos de SiC y GaN que se muestran en la clasificación de la figura 2 [8].

## II. DISPOSITIVOS DE CARBURO DE SILICIO (SiC)

Los dispositivos que son diseñados con este nuevo material se presentan, hoy en día, como alternativa para fabricar convertidores de potencia. El material SiC tiene importantes ventajas sobre el silicio, como mayores niveles de tensión, menores caídas de tensión, mayores temperaturas y mayor conductividad térmica [9]. Por otro lado, la principal desventaja del SiC reside en que el proceso de fabricación es más complicado que el del silicio. Además, el precio del sustrato es mayor que el del silicio. Sin embargo, existen fabricantes como CREE, Fuji Electric, GeneSiC, Infineon, etc, que gracias a la aparición de nuevos métodos de producción, pueden fabricar y desarrollar dispositivos con esta tecnología a precios razonables y con calidad. Estos fabricantes, incluso, pueden producir módulos totalmente de SiC de varias topologías (tabla II).

### A. Diodos SiC

Las principales ventajas de estos diodos son la recuperación inversa y las pérdidas de conmutación, ya que los diodos SiC tienen gran independencia de la carga de recuperación inversa ( $Q_{RR}$ ), de las variaciones de corriente ( $\frac{di}{dt}$ ), de los niveles de corriente y de la unión térmica. Estos dispositivos normalmente tienen una baja  $Q_{RR}$ , comparada con los valores de los diodos de silicio, y un coeficiente de temperatura

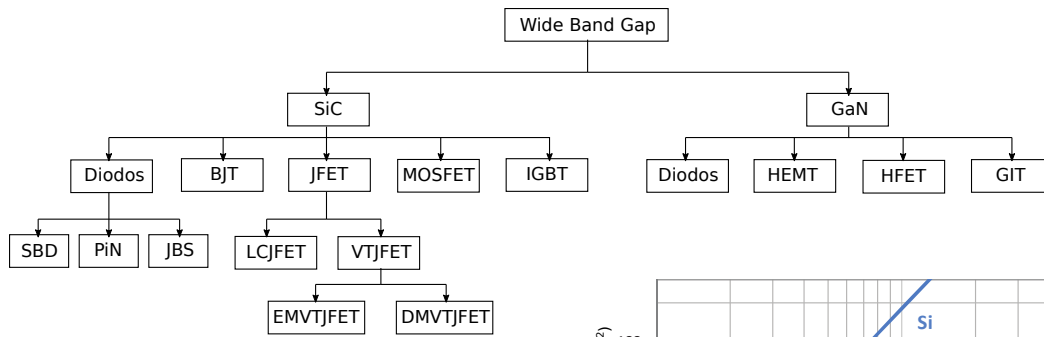


Fig. 2. Clasificación de dispositivos SiC y GaN que forman la tecnología WBG.

positivo que reducen el EMI [10]. Con los diodos SiC es posible obtener voltajes 10 veces superiores al silicio en el mismo tamaño de dispositivo. Existen 3 tipos de diodos SiC: *schottky barrier diodes* (SBD), PiN y *junction barrier schottky* (JBS) [11], [12]. Finalmente, es importante decir que los diodos SiC son los dispositivos WBG más desarrollados, ya que existe gran cantidad de fabricantes como CREE, Global Power e Infineon con capacidad de producir diodos de muy diversos rangos de tensión y corriente (figura 5(a)). Aunque la calidad de los dispositivos es muy distinta entre fabricantes, los voltajes se encuentran entre los 600-1700 V y corrientes de 2-10 A con  $Q_{RR}$  de 3 – 370 nC (figuras 5(b) y 5(c)).

### B. BJT SiC

Se trata de un dispositivo bipolar que se encuentra apagado por defecto (esto no ocurrirá en otros dispositivos, tal y como verá más adelante). Algunas ventajas que presenta este dispositivo son las bajas caídas de tensión de conducción y baja tensión base-emisor, cancelación de tensión base-colector y un rápido comportamiento de conmutación. Sin embargo, la principal desventaja de este dispositivo es que es controlado por corriente, ello implica que el diseño del *driver* de control es más complicado que el diseño de un dispositivo controlado por tensión. Estas ventajas y desventajas son típicas de la estructura BJT, pero los BJTs de SiC tienen otras mejoras respecto a las estructuras de silicio. Dichas mejoras se deben al buen comportamiento con alta tensión y temperatura evitando que el óxido de la estructura de compuerta se deteriore (figura 3) [13]. Además, dichos dispositivos son muy sencillos de paralelizar debido a que con el incremento de temperatura la ganancia de corriente decrece y la resistencia térmica aumenta [8]. El fabricante GeneSiC ha desarrollado un BJT especial (figura 5(d)), cuyo nombre es SJT (*super junction transistor*) que se controla mediante tensión, de esta forma estos BJTs pueden ser controlados mediante los mismos circuitos de *driver* que la tecnología MOSFET. Estos nuevos dispositivos BJT suelen tener unos valores  $h_{fe}$  de 104 (A/A) y rangos de corriente 3-160 A (figuras 5(e) y 5(f)).

### C. JFET SiC

En el desarrollo de este semiconductor fue fundamental la mejora del sustrato SiC para poder fabricar dicho dispositivo, tal y como se conoce hoy en día. Éste es un dispositivo muy interesante para aplicaciones de electrónica de potencia por algunas de sus características [14]:

- Existen uniones  $p-n$  que permiten operar a alta temperatura sin problemas de estabilidad.
- La tensión umbral para el apagado o encendido no depende de la temperatura.

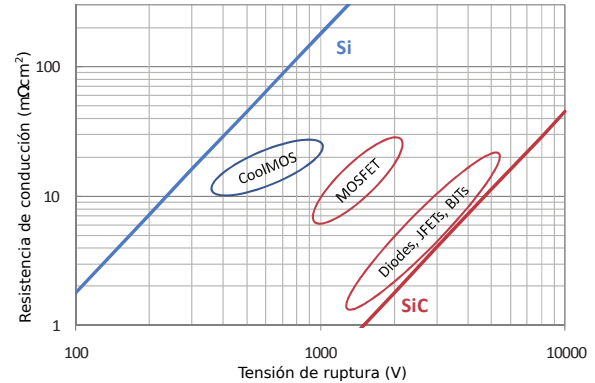


Fig. 3. Tensión de ruptura de los BJT de SiC.

- Es posible ajustar la resistencia de conducción con la temperatura.

Los JFETs de SiC se pueden clasificar en dos tipos de dispositivos [15]:

- Lateral channel JFET* (LCJFET): se encuentra encendido por defecto y es necesario aplicar un voltaje negativo entre compuerta - drenador para apagar el transistor.
- Vertical trench JFET* (VTJFET): este tipo tiene dos variantes EMVTJFET (apagado por defecto) y DMVTJFET (encendido por defecto). El DMVTJFET no tiene en su estructura un diodo antiparalelo y, por esa razón, es de gran interés para muchas aplicaciones, ya que es posible conectarlos con otros diodos SiC en antiparalelo.

Algunos fabricantes (figura 5(g)), como Infineon y United Silicon Carbide (USC) fabrican dispositivos DMVTJFET, los cuales mantienen la problemática de ser dispositivos encendidos por defecto. Sin embargo, United Silicon Carbide, es capaz de combinar los dispositivos SiC JFET con un transistor MOSFET en modo cascodo para solventar el problema de encendido por defecto y obtener un dispositivo estándar. Por último, los JFET de SiC presentan bajas resistencias de conducción (1,6-6  $\Omega$ , figuras 5(h) y 5(i)) trabajando a temperaturas de 175°C para voltajes de 1200 V y rangos de corriente entre 21-38 A.

### D. MOSFET SiC

Hoy en día, este dispositivo ofrece el mejor comportamiento para aplicaciones de potencia debido a que su estructura es vertical, está apagado por defecto y emplea circuitos de *driver* sencillos. Además, los MOSFETs de SiC tienen una carga de compuerta similar a los IGBTs de silicio y, por estas razones, pueden ser usados con los mismos circuitos de control. La principal desventaja es la falta de robustez, ya que el óxido de la compuerta puede perder estabilidad y fiabilidad, pero los fabricantes están trabajando para solventar este problema y obtener mejores dispositivos [8] capaces de trabajar a altas temperaturas entre 150-200°C.

Los módulos que implementan MOSFETs de SiC suelen aparecer con diodos JBS de SiC (figura 5(j)) formando estruc-

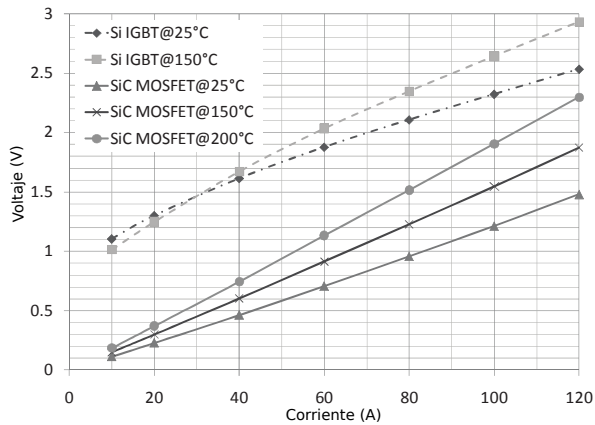


Fig. 4. Tensión de conducción de MOSFET SiC y Si IGBT. Tensiones similares a los IGBTs de silicio con sus diodos *Schottky* en antiparalelo. Estos módulos de SiC pueden ser comparados con los módulos IGBT de silicio, como ocurre en la figura 4, ya que presentan pérdidas de encendido similares pero mejores comportamientos de apagado [16], con rangos de tensión (400-1700 V) y corriente (2,6-100 A) similares para aplicaciones de potencia media (figuras 5(k) y 5(l)).

### E. IGBT SiC

Actualmente, estos dispositivos son prototipos en fase experimental. Por esta razón, sus prestaciones están lejos de lo que se espera lograr en un futuro [17]. El principal inconveniente es el material del sustrato, ya que los fabricantes no son capaces de encontrar la concentración adecuada de electrones y huecos. Por otro lado, las técnicas y procesos de fabricación deben ser estandarizadas para poder disponer de una producción industrial [18]. Hay que tener en cuenta que cuando los fabricantes hablan de IGBTs de SiC, en realidad se trata de IGBTs de silicio con diodos de SiC que mejoran las propiedades de los IGBTs (600-1200 V y 15-600 A), como ocurre en los módulos de la tabla I.

## III. DISPOSITIVOS DE NITRURO DE GALIO (GAN)

Este nuevo material presenta un gran interés para ser usado en dispositivos para elevados voltajes y temperaturas, gracias a su *wide bandgap* (WBG), su amplia zona de campo eléctrico, su movilidad de los electrones y su buena conductividad térmica. El material GaN tiene grandes ventajas sobre el silicio, incluso sobre el SiC, ya que tiene un mayor nivel de ruptura con menor resistencia de conducción para el mismo área (figura 6). En un futuro se espera obtener un sustrato que sea más de 100 veces superior al silicio y 10 veces al SiC [19]. Los dos principales aspectos que debe mejorar dicho material son la resistencia de conducción y la velocidad de conmutación, ello redundará en una reducción de las pérdidas tanto de conducción como conmutación.

Sin embargo, hoy en día, la mayoría de los dispositivos de GaN son prototipos sin una producción industrial. No obstante, existen algunas soluciones híbridas con silicio e, incluso, con SiC. Estos dispositivos híbridos, también llamados estructuras heterogéneas, permiten la producción de grandes cantidades de dispositivos, lo que no es posible con estructuras homogéneas de GaN por problemas con el sustrato. Cuando la tecnología sea capaz de producir un sustrato de GaN de gran calidad y sin ningún problema en las uniones, los *dies* de los dispositivos serán más pequeños, reduciéndose los efectos

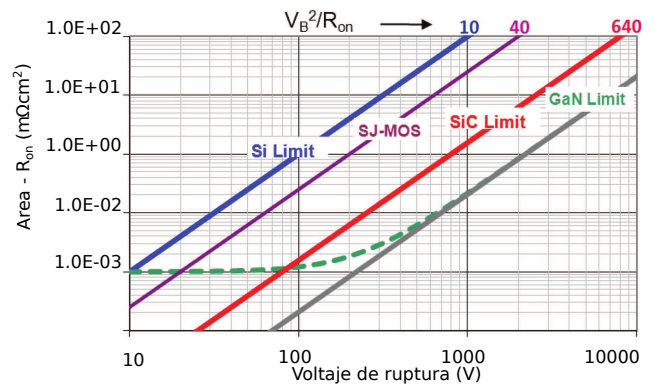


Fig. 6. Tensión de ruptura del GaN.

de EMI y bajando los costes. Por todas estas razones, hay una gran expectativa en esta tecnología para aplicaciones de automoción y tracción donde es necesaria la aparición de mejoras respecto a las pérdidas de potencia, temperatura e integración de los sistemas [20].

### A. Diodos GaN

El sustrato GaN tiene algunos problemas con la conductividad eléctrica y su calidad que afecta la barrera *Schottky*. Por ello, los diodos GaN *Schottky* (600 V/10-15 A) presentan una estructura lateral o quasi-vertical. Además, el coste del material GaN es muy elevado y los fabricantes prefieren diseñar los diodos con estructuras heterogéneas como silicio, SiC e, incluso, zafiro [21].

### B. HEMT/HFET GaN

Se trata de un transistor unipolar de canal *n* con diseño lateral y suelen ser fabricados con una estructura AlGaIn/GaN sobre un sustrato heterogeneo como el silicio. En el proceso de fabricación de este dispositivo hay que destacar la formación de dos capas entre el GaN y el silicio [22]:

- AlGaIn/AlN: esta capa es muy importante para controlar el crecimiento de las otras.
- GaN/AlN: se encuentra en el medio de la estructura superior y reduce el número de rupturas que se producen en el dispositivo.

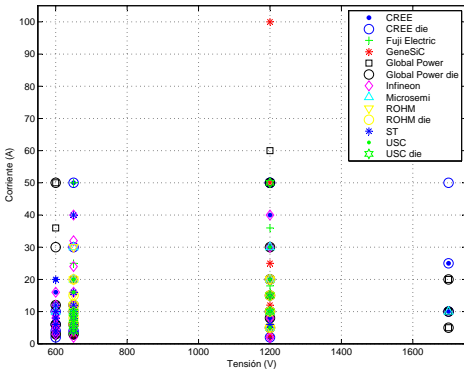
Cuando las capas AlGaIn y GaN se conectan, se forma una capa llamada 2DEG, la cual proporciona al dispositivo la pequeña resistencia de conducción. El dispositivo destaca por tener un especial comportamiento:

- Corriente de colapso: se produce cuando un voltaje continuo entre drenador-fuente captura un electrón en la capa AlGaIn (*buffer*). Este efecto produce un incremento de la resistencia de conducción, un aumento del voltaje de bloqueo y una reducción de la capacidad del dispositivo.
- Efecto de canal corto: la distancia entre fuente-compuerta y la longitud de la compuerta son fundamentales para reducir los efectos *punch through*. Estos dependen del voltaje drenador-fuente para suministrar corriente al drenador cuando éste se encuentra fuera de la región de saturación.

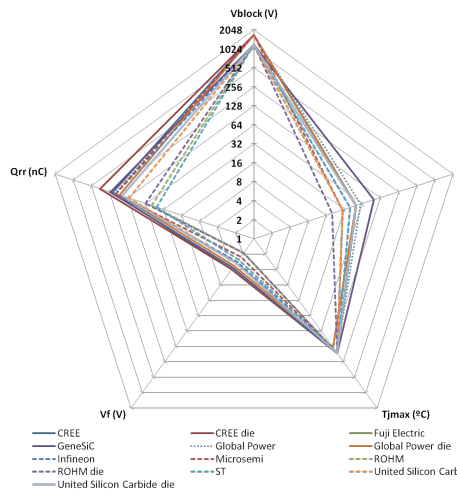
En este dispositivo, el voltaje de bloqueo depende linealmente del grosor de la capa epitaxial y sus rangos de tensión y corriente son, aproximadamente, de 600 V y 10 A.

### C. HEMT cascodo GaN

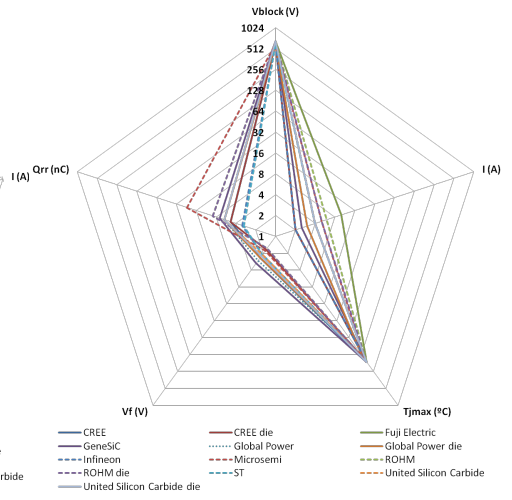
La tecnología permite implementar GaN sobre silicio con buenos resultados para aplicaciones de media potencia. Es



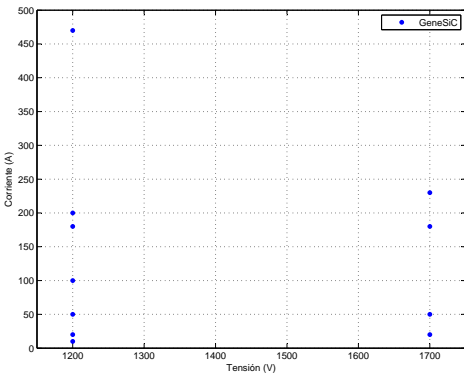
(a) Rangos de V e I de los diodos SiC.



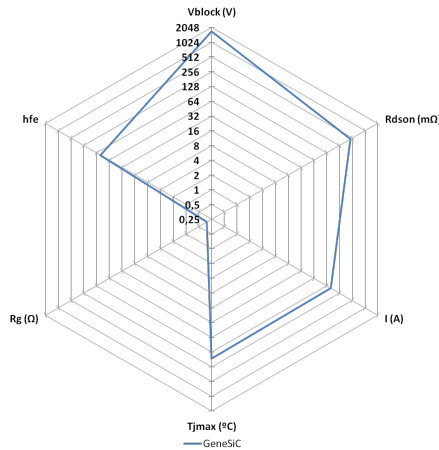
(b) Valores máximos de diodos SiC.



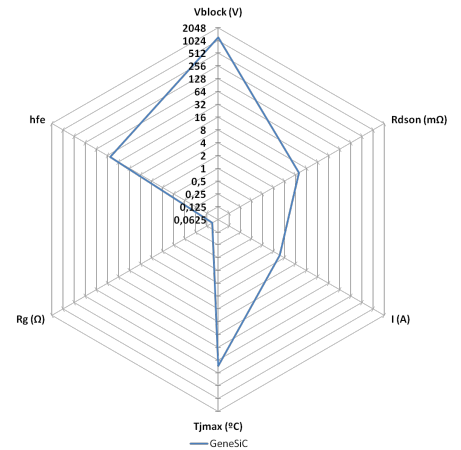
(c) Valores mínimos de diodos SiC.



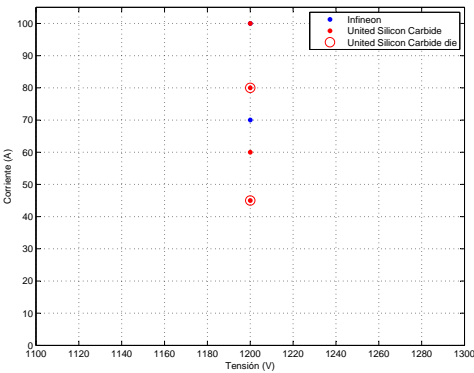
(d) Rangos de V e I de los BJTs SiC.



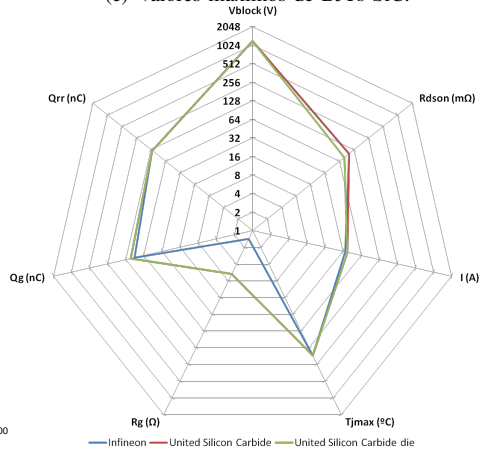
(e) Valores máximos de BJTs SiC.



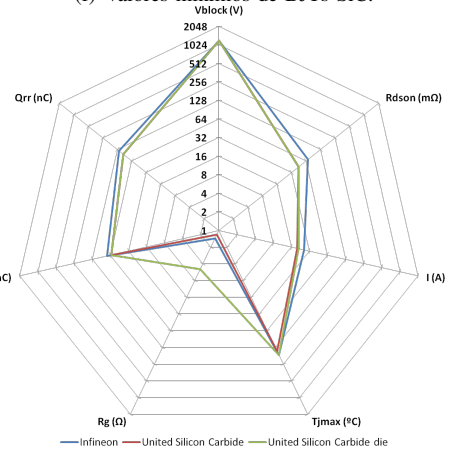
(f) Valores mínimos de BJTs SiC.



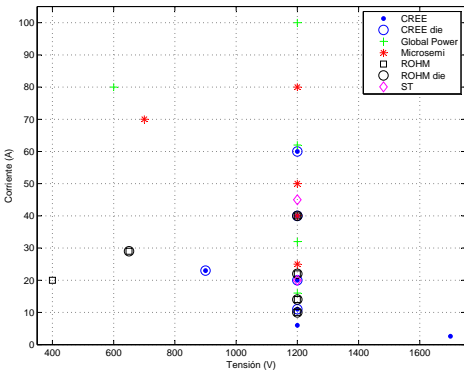
(g) Rangos de V e I de los JFETs SiC.



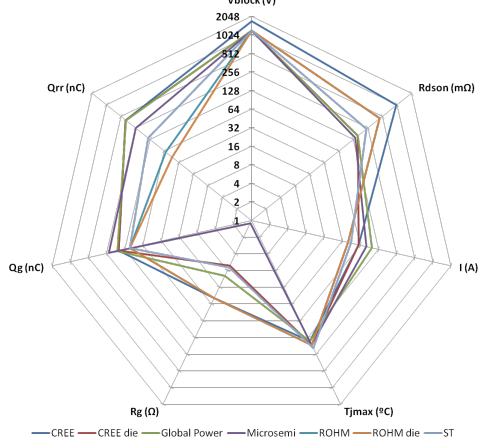
(h) Valores máximos de JFETs SiC.



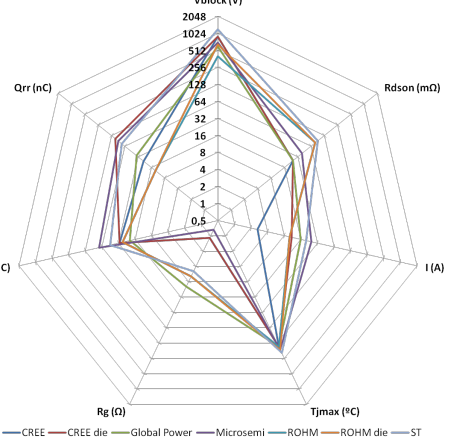
(i) Valores mínimos de JFETs SiC.



(j) Rangos de V e I de los MOSFETs SiC.



(k) Valores máximos de MOSFETs SiC.



(l) Valores mínimos de MOSFETs SiC.

Fig. 5. Estado de la tecnología de distintos dispositivos SiC de potencia de los fabricantes mas relevantes.

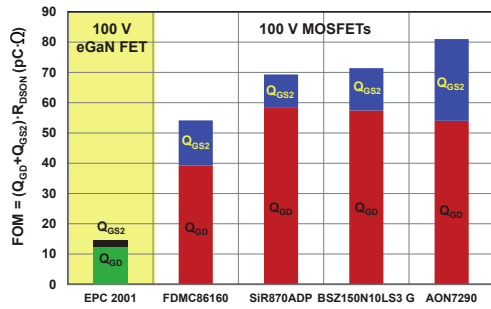


Fig. 7. Pérdidas de potencia en HEMT cascodo de GaN.

importante indicar que estos dispositivos pueden conducir corriente en ambos sentidos. Ello hace que los dispositivos HEMT de GaN muestren un gran potencial como diodos *freewheeling*. La solución GaN que puede implementar esta tecnología es el HEMT híbrido de GaN [23]. Un ejemplo de fabricante de estos dispositivos es Transphorm. Este dispositivo tiene un dispositivo tradicional de silicio en configuración cascodo para garantizar la seguridad de la aplicación de potencia. La configuración consiste en un dispositivo HEMT GaN cuya entrada de alta tensión está conectada a la salida del transistor de silicio. De esta manera, se garantiza que el dispositivo se encuentre apagado por defecto, que es una carencia del dispositivo HEMT de GaN. El dispositivo presenta unas menores pérdidas en comparación con la tecnología MOSFET de silicio, como se ve en la figura 7, permitiendo trabajar a frecuencias elevadas. Sin embargo, la principal desventaja son los reducidos rangos de tensión y corriente (600 V/12 A) [24].

D. GIT GaN

El dispositivo GIT de GaN surge para solucionar el principal problema de los transistores de GaN: están encendidos por defecto. El GIT introduce una capa *p*-AlGaIn sobre la estructura AlGaIn/GaN para solucionar este problema. Los diseñadores introducen una polarización para tener un mayor nivel de portadores en la capa AlGaIn/GaN. De esta forma, el dispositivo está apagado por defecto. Por lo tanto, se puede decir que el GIT es una evolución del transistor HFET/HEMT de GaN. Además, este nuevo transistor solventa los problemas con la corriente de colapso que presentan los dispositivos HFET de GaN y, por esta razón, los GIT se pueden usar en aplicaciones de electrónica de potencia como inversores de fase. La figura 8 muestra la mejora de eficiencia de un inversor fabricado con dispositivos GIT en lugar de IGBTs más el diodo antiparalelo [25]. El GIT es bidireccional, de manera que no son necesarios los diodos antiparalelos. El problema, como ocurre en el dispositivo cascodo GaN, es que los rangos de tensión y corriente son todavía bajos, ya que el dispositivo se encuentra en desarrollo. Panasonic es uno de los fabricantes que está trabajando en el desarrollo de dicho dispositivo (600 V/15 A).

IV. CONCLUSIONES

Los nuevos materiales (SiC y GaN) para los semiconductores de potencia están siendo desarrollados por la mayoría de los fabricantes, debido a que sus propiedades pueden solventar las limitaciones que tienen los dispositivos tradicionales de silicio. El SiC tiene un gran nivel de desarrollo. En este sentido, es posible encontrar diferentes tipos de dispositivos como diodos, BJTs, FETs y MOSFETs con unos rangos de tensión entre 600-1700 V y corriente de 10-100 A (excepto

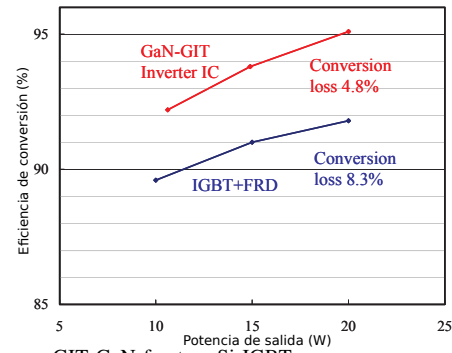


Fig. 8. Inversor GIT GaN frente a Si IGBT.

TABLA I  
MÓDULOS DE SI IGBTs COMBINADOS CON SiC.

	FABRICANTE	REFERENCIA	V <sub>block</sub> (V)	I(A)	T <sub>max</sub> (°C)	Rg (Ω)	Qg (nC)	Qrr (nC)
Si IGBT + SiC Diode	GeneSiC	GA35XCP12-247	1200	35	150	-	50	-
		GB100KCP12-227	1200	100	175	2	900	730
Half Bridge	Fuji Electric	2M50400VE-170-53	1700	400	150	5.6	4500	-
	Infineon	FF60R121S4F	1200	600	150	1.3	6300	0
	Semikron	SKM200G812T45IC	1200	200	175	3.8	1130	-
Six Pack	Infineon	FS100R17K54F	1700	100	125	1.3	1200	0
		SKM309G0125SiC	1200	300	150	0.8	2800	3300
	Semikron	SKM459G012F45C4	1200	450	175	1.7	3420	-
Boost Chopper	Global Power	GH5040A0605-A1	600	40	150	50	115	50
		GH5060A0605-A1	600	60	150	50	150	75
		GH5080A0605-A1	600	80	150	50	230	100
		GH5030A1205-A1	1200	30	150	63	255	52
		GH5040A1205-A1	1200	40	150	63	480	104
		GH5060A1205-A1	1200	60	150	63	340	105
	Infineon	DF75R12W1H4F_B11	1200	75	125	0	11000	250
		DF80R12W2H3F_B11	1200	80	125	0	320	250
		DF160R12W2H3F_B11	1200	160	150	0	320	250
		APT50GF60CU2	600	50	150	25	166	28
	Microsemi	APT15GF120CU2	1200	15	150	100	99	40
		APT25GF120CU2	1200	25	150	50	160	40
		APTGF50DA120CT1G	1200	50	150	50	330	80
		APT25GLQ120CU2	1200	25	175	60	200	100
Apt	APT40GLQ120CU2	1200	40	150	35	185	80	
	APTGLQ40DA120CT3G	1200	40	150	30	185	42	
Buck Chopper	Global Power	GH5040A0605-A2	600	40	150	50	115	50
		GH5060A0605-A2	600	60	150	50	150	75
		GH5080A0605-A2	600	80	150	50	230	100
		GH5030A1205-A2	1200	30	150	63	255	52
		GH5040A1205-A2	1200	40	150	63	480	104
		GH5060A1205-A2	1200	60	150	63	340	105
Four Pack	Infineon	F4-50R07W2H3_B51	650	50	125	0	500	2450
		F4-75R07W2H3_B51	650	75	125	0	800	4000
3- level	Infineon	FS3L30R07W2H3F_B11	650	30	125	0	300	2200
		FS3L50R07W2H3F_B11	650	50	125	0	500	2500

algunos BJTs de mayor corriente), incluso es posible encontrar módulos basados totalmente en SiC (tabla II). Uno de los retos es conseguir fabricar un IGBT o dispositivo equivalente con SiC. A día de hoy, existen algunos estudios experimentales que están tratando de conseguir una estructura estable en esta línea. Así todo, la tecnología SiC se encuentra en continua evolución para lograr mejores eficiencias posibles gracias a las cualidades del material. Por otro lado, la tecnología GaN necesita un mayor desarrollo, ya que la mayoría de los dispositivos son experimentales y existen problemas para fabricar un dispositivo totalmente de GaN, presentando unos rangos reducidos de tensión y corriente sobre 600 V/10 A.

TABLA II  
ALGUNOS MÓDULOS full SiC EXISTENTES EN EL MERCADO.

FABRICANTE	REFERENCIA	V <sub>block</sub> (V)	R <sub>gson</sub> (mΩ)	I(A)	T <sub>max</sub> (°C)	Rg (Ω)	Qg (nC)	Qrr (nC)
SiC MOSFET + SiC diode	GeneSiC	GA1050CF12-247	1200	100	25	175	—	55
	GA2050CF12-247	1200	50	45	175	—	100	
	GA5050CF12-227	1200	20	80	175	0.09	474	
	GA1005CF12-227	1200	10	200	175	0.09	478	
Semikron	SKM5MLET12Cp	1200	—	45	175	4.7	189	
Half bridge	CREE	CAS120M12M42	1200	13	120	150	1.8	378
	CAS300M12M42	1200	5	300	150	3	166	
	CAS300M17M42	1700	8	225	150	3.7	1076	
	Microsemi	APTMC120AM12SCT3AG	1200	55	40	150	75	98
	APTMC120AM12SCT3AG	1200	50	59	175	7.5	272	
	APTMC120AM12SCT3AG	1200	20	100	150	30	360	
	APTMC120AM12SCT3AG	1200	25	118	175	4	544	
	APTMC120AM12SCT3AG	1200	17	178	175	2.5	816	
	APTMC120AM12SCT3AG	1200	8	185	150	15	490	
	APTMC120AM12SCT3AG	1200	11	268	175	1.5	1224	
	APTMC120AM12SCT3AG	1200	10	293	175	2	1360	
	APTMC120AM12SCT3AG	1200	25	80	150	30	197	
	APTMC120AM12SCT3AG	1200	16	100	150	30	246	
	APTMC120AM12SCT3AG	1200	12	150	150	20	483	
	APTMC120AM12SCT3AG	1200	9	200	150	15	644	
	APTMC120AM12SCT3AG	1700	60	40	150	60	190	
	APTMC120AM12SCT3AG	1700	60	80	150	30	380	
	ROHM	BSM180D12P2C101	1200	180	150	1.15	—	—
	BSM120D12P2C005	1200	120	150	—	—	—	
	BSM180D12P3C007	1200	180	150	—	—	—	
BSM300D12P2E001	1200	300	175	—	—	—		
Semikron	SKM500M1205C	1200	541	175	0.39	2268	—	
Six Pack	CREE	CCS020M12CM2	1200	80	20	150	3.8	61.5
	CCS00M12CM2	1200	25	50	150	1.5	180	
	Microsemi	APTMC120TAM12SCT3AG	1200	12	150	175	5	408
	APTMC120TAM12SCT3AG	1200	33	60	150	30	148	
	APTMC120TAM12SCT3AG	1200	17	100	150	30	322	
	APTMC120TAM12SCT3AG	1200	12	150	150	20	483	
Semikron	SKMIP18ACM12V17	1200	24	150	9	110	—	
SKM5MHT12S2p	1200	45	175	4.7	189	—		
SBD rectifier	Global Power	GHXS01A0605-01	600	10	175	—	—	25
	GHXS02A0605-01	600	20	175	—	—	50	
	GHXS03A0605-01	600	30	175	—	—	75	
	GHXS015A1205-01	1200	15	150	—	—	52	
	GHXS030A1205-01	1200	30	175	—	—	105	
	GHXS06A1205-01	1200	60	175	—	—	208	
SBD Parallel	Global Power	GHXS01A0605-03	600	10	175	—	—	25
	GHXS02A0605-03	600	20	175	—	—	50	
	GHXS03A0605-03	600	30	175	—	—	75	
	GHXS050A0605-03	600	50	175	—	—	173	
	GHXS015A1205-03	1200	15	175	—	—	52	
	GHXS030A1205-03	1200	30	175	—	—	105	
GHXS045A1205-03	1200	45	175	—	—	156		
GHXS060A1205-03	1200	60	175	—	—	208		
SBD Anti-parallel	Global Power	GHXS01A0605-04	600	10	175	—	—	50
	GHXS02A0605-04	600	20	175	—	—	50	
	GHXS03A0605-04	600	30	175	—	—	75	
	GHXS050A0605-04	600	50	175	—	—	100	
	GHXS015A1205-04	1200	15	175	—	—	52	
	GHXS030A1205-04	1200	30	175	—	—	105	
GHXS045A1205-04	1200	45	175	—	—	156		
GHXS060A1205-04	1200	60	175	—	—	208		

Existen algunas soluciones híbridas (GaN sobre silicio) como el HEMT/HFET, encendido por defecto, y por esa razón deben ser controlados con un MOSFET de silicio (estructura cascodo). Los dispositivos GaN tienen que ser desarrollados para poder usar las buenas propiedades de su material. Por último, se puede afirmar que, hoy en día, los dispositivos SiC son mejor opción que los GaN por la madurez de la tecnología.

#### V. AGRADECIMIENTOS

El trabajo descrito en esta publicación ha sido generado en la Unidad de Formación e Investigación UF11/16 financiada por la UPV/EHU y patrocinado por el Departamento de Educación, Universidades e Investigación del Gobierno Vasco a través de: las ayudas para apoyar las actividades de grupos de investigación del sistema universitario vasco IT394-10 y del proyecto de investigación KT4TRANS del programa ELKARTEK (KK-2015/00047). La financiación del Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto de investigación DPI2014-53685-C2-2-R y los fondos FEDER. Así como, a través del programa de apoyo a la formación de investigadores del Gobierno Vasco PRE.2015.2.0012.

#### REFERENCIAS

- [1] A. Mauder, T. Laska, and L. Lorenz, "Dynamic behaviour and ruggedness of advanced fast switching IGBTs and diodes," in *Conference Record of the Industry Applications*, 2003, pp. 995–999.
- [2] M. Mori, K. Oyama, T. Arai, J. Sakano, Y. Nishimura, K. Masuda, K. Saito, Y. Uchino, and H. Homma, "A Planar-Gate High-Conductivity IGBT (HiGT) With Hole-Barrier Layer," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 54, no. 6, pp. 1515–1520, June 2007.
- [3] M. Harada, T. Minato, H. Takahashi, H. Nishihara, K. Inoue, and I. Takata, "600 V trench IGBT in comparison with planar IGBT-an evaluation of the limit of IGBT performance," in *Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*, 1994, pp. 411–416.
- [4] Y. Onishi, S. Momota, Y. Kondo, M. Otsuki, N. Kumagai, and K. Sakurai, "Analysis on device structures for next generation IGBT," in *Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*, 1998, pp. 85–88.
- [5] R. Siemieniec, M. Netzel, and R. Herzer, "Comparison of PT and NPT cell concept for 600 V IGBTs," in *European Conference on Power Electronics and Applications*, 1997, pp. 24–28.
- [6] X. Kang, A. Caiafa, E. Santi, J. Hudgins, and P. Palmer, "Characterization and modeling of high-voltage field-stop IGBTs," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, no. 4, pp. 922–928, July 2003.
- [7] H. Ruthing, F. Umbach, O. Hellmund, P. Kanschhat, and G. Schmidt, "600V-IGBT3: trench field stop technology in 70 um ultra thin wafer technology," *IEE Circuits, Devices and Systems*, vol. 151, no. 3, pp. 211–214, June 2004.
- [8] M. Ostling, R. Ghandi, and C. M. Zetterling, "SiC power devices ; Present status, applications and future perspective," in *Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*, May 2011, pp. 10–15.
- [9] J. Biela, M. Schweizer, S. Waffler, and J. Kolar, "SiC versus Si - Evaluation of Potentials for Performance Improvement of Inverter and DC-DC Converter Systems by SiC Power Semiconductors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 7, pp. 2872–2882, July 2011.
- [10] M.-S. Lee, J.-H. Lee, B.-S. Jin, J.-B. Lee, D.-W. Chung, and W. Frank, "New intelligent power module with silicon carbide diode," in *International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE ECCE)*, May 2011, pp. 1083–1086.
- [11] J. Millan, "A review of wbg power semiconductor devices," in *Semiconductor Conference (CAS)*, October 2012, pp. 57–66.
- [12] J. Millan, P. Godignon, X. Perpina, A. Perez-Tomas, and J. Rebollo, "A survey of wide bandgap power semiconductor devices," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 5, pp. 2155–2163, May 2014.
- [13] H. Yu, J. Lai, X. Li, Y. Luo, L. Fursin, J. Zhao, P. Alexandrov, B. Wright, and M. Weiner, "An IGBT and MOSFET gated SiC bipolar junction transistor," in *Conference Record of the Industry Applications Conference*, 2002, pp. 2609–2613.
- [14] P. Friedrichs and R. Rupp, "Silicon carbide power devices - current developments and potential applications," in *European Conference on Power Electronics and Applications*, 2005, pp. 11–22.
- [15] J. Rabkowski, D. Pefititsis, and H.-P. Nee, "Silicon carbide power transistors: A new era in power electronics is initiated," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 6, no. 2, pp. 17–26, 2012.
- [16] H. Mirzaee, A. De, A. Tripathi, and S. Bhattacharya, "Design Comparison of High-Power Medium-Voltage Converters Based on a 6.5-kV Si-IGBT/Si-PiN Diode, a 6.5-kV Si-IGBT/SiC-JBS Diode, and a 10-kV SiC-MOSFET/SiC-JBS Diode," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 4, pp. 2728–2740, July 2014.
- [17] M. Avram, G. Brezeanu, A. Avram, O. Neagoe, M. Brezeanu, C. Iliescu, C. Codreanu, and C. Voitincu, "Contributions to development of high power SiC-IGBT," in *International Semiconductor Conference (CAS)*, 2005, pp. 365–368.
- [18] K.-W. Chu, W.-S. Lee, C.-Y. Cheng, C.-F. Huang, F. Zhao, L.-S. Lee, Y.-S. Chen, C.-Y. Lee, and M.-J. Tsai, "Demonstration of Lateral IGBTs in 4H-SiC," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 34, no. 2, pp. 286–288, February 2013.
- [19] K. Boutros, R. Chu, and B. Hughes, "GaN power electronics for automotive application," in *IEEE Energytech*, May 2012, pp. 1–4.
- [20] S. Araujo, M. Kazanbas, M. Wendt, T. Kleeb, and P. Zacharias, "Prospects of GaN devices in automotive electrification," in *PCIM Europe*, May 2014, pp. 1–8.
- [21] N. Kaminski and O. Hilt, "SiC and GaN devices - wide bandgap is not all the same," *IET Circuits, Devices Systems*, vol. 8, no. 3, pp. 227–236, May 2014.
- [22] M. Hikita, M. Yanagihara, K. Nakazawa, H. Ueno, Y. Hirose, T. Ueda, Y. Uemoto, T. Tanaka, D. Ueda, and T. Egawa, "AlGaN/GaN power HFET on silicon substrate with source-via grounding (SVG) structure," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 52, no. 9, pp. 1963–1968, September 2005.
- [23] D. C. Sheridan, D. Lee, A. Ritenour, V. Bondarenko, J. Yang, and C. Coleman, "Ultra-Low Loss 600V - 1200V GaN Power Transistors for High Efficiency Applications," in *PCIM Europe*, May 2014, pp. 1–7.
- [24] K. Shirabe, M. Swamy, J.-K. Kang, M. Hisatsune, Y. Wu, D. Kebort, and J. Honea, "Efficiency Comparison Between Si-IGBT-Based Drive and GaN-Based Drive," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 1, pp. 566–572, January 2014.
- [25] Y. Uemoto, M. Hikita, H. Ueno, H. Matsuo, H. Ishida, M. Yanagihara, T. Ueda, T. Tanaka, and D. Ueda, "Gate Injection Transistor (GIT) 2014: A Normally-Off AlGaN/GaN Power Transistor Using Conductivity Modulation," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 54, no. 12, pp. 3393–3399, December 2007.