

Carburo de silicio, base de los futuros semiconductores de alta potencia

Durante el próximo decenio, el silicio probablemente irá siendo sustituido por el carburo de silicio como base de los semiconductores de potencia, especialmente para las tensiones de bloqueo superiores a 500 V. Los componentes de carburo de silicio tienen pérdidas mucho menores que los semiconductores de potencia actuales. Además dominan mayores tensiones de bloqueo y temperaturas de servicio mucho más elevadas.

Los elementos constructivos de los semiconductores, como diodos, tiristores, transistores e IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), son componentes fundamentales de la electrónica de potencia de ABB. Su aplicación se extiende sobre todo a los accionamientos, a los sistemas de alimentación de energía y a los vehículos de ferrocarril, como tranvías y locomotoras eléctricas. En la gama alta se encuentran los compensadores estáticos de potencia reactiva y otros equipos destinados al perfeccionamiento del transporte de energía, entre ellos las instalaciones de transporte de corriente continua de alta tensión (CCAT). La gama de potencias de los productos de ABB con semiconductores se extiende a ocho órdenes de dimensión, desde unos cientos de vatios hasta varios gigavatios.

ABB fabrica además semiconductores de potencia, especialmente de los tipos con tensión de ruptura superior a 1,5 kV. Algunos productos importantes son los tiristores GTO (*Gate Turn Off*), los tiristores de alta tensión y los diodos.

El elemento ideal de conmutación, una quimera hasta hoy

Los diseñadores de circuitos eléctricos desean conseguir componentes que bloqueen tensiones elevadas en estado abierto y admitan corrientes elevadas en

estado de conducción y que, además, consuman un mínimo de energía al pasar, si es posible sin pérdidas, de un estado a otro.

Este componente ideal aún no existe. En la práctica se emplean, dependiendo del campo de aplicación, distintos elementos de conmutación que se acercan más o menos al ideal en ciertos sentidos. Las altas pérdidas de potencia de los elementos de conmutación de semiconductores obligan frecuentemente a elegir un tipo de elemento de conmutador más alejado del ideal. Este problema se hace más agudo en las tensiones elevadas **1**.

El MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) se aproxima mucho al elemento de conmutación ideal. Desgraciadamente no sirve sino para tensiones relativamente bajas, ya que las pérdidas aumentan con rapidez con la tensión de bloqueo.

El IGBT es, por así decir, un MOSFET modificado que evita los inconvenientes de éste al precio, sin embargo, de tener pérdidas de conmutación más altas.

Dr. Karl Bergman

ABB Forschungszentrum
Västerås/Schweden

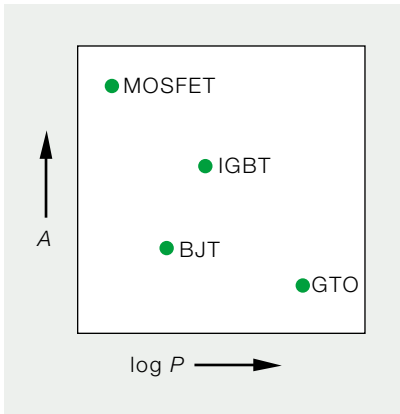
Desde los años ochenta, el IGBT ha ido arrinconando cada vez más al BJT (*Bipolar Junction Transistor*) como semiconductor de potencia para tensiones de bloqueo desde algunos cientos de voltios hasta 2 kV o más. El tiristor GTO domina aún en la gama por encima de 2 kV. Puede comandar potencias muy altas pero requiere medios de conmutación relativamente complejos comparado con el MOSFET y el IGBT.

Lo que el diseñador de circuitos eléctricos busca, por tanto, es un componente que aúne la simplicidad de uso de los MOSFET y las grandes potencias comandables de los IGBT y GTO, es decir, un elemento situado en la zona superior derecha en la figura **1**. Precisamente esto es lo que ofrece un MOSFET de carburo de silicio.

Los componentes de carburo de silicio

El carburo de silicio (SiC) tiene una resistencia a descargas disruptivas contra los campos eléctricos unas 10 veces más alta que el silicio (Si). Las pérdidas de los componentes de SiC pueden ser, por tanto, mucho menores. Por ejemplo, las estructuras MOSFET a base de SiC podrían llegar a dominar tensiones de ruptura de varios kV, mientras que el valor máximo de los correspondientes componentes de Si está limitado a 500–1000 V.

En el pasado, los nuevos tipos de elementos de conmutación han servido para revolucionar la construcción de los sistemas de electrónica de potencia. Así, la introducción de los GTO, los primeros componentes verdaderamente de alta potencia con elevado poder de desconexión, modificó la concepción de los accionamientos para locomotoras eléctricas: de los motores de tracción de corriente continua y motores síncronos con alimentación por convertidores conmutados por red se pasó a los motores de tracción trifásicos con alimentación por convertidores de conmutación automática con circuito intermedio de tensión continua. En el campo de los accionamientos industriales, la introducción de los IGBT permitió simplificar los circuitos de mando y de corriente fuerte, lo que se tradujo en una mejora del comportamiento de explotación y en una reducción de costes.



Comparación subjetiva de los distintos tipos de componentes semiconductores: aplicabilidad A en función de la potencia dominante P

El carburo de silicio domina intensidades de campo 10 veces mayores

Para poder dominar una tensión U_b , la capa de barrera de un semiconductor debe tener cierto espesor que permita no superar la intensidad máxima de campo eléctrico $E_{m\acute{a}x}$ que el material debe soportar sin que se produzca descarga. Este espesor mínimo W de la capa de barrera viene expresado por la siguiente relación:

$$W > \frac{2U_b}{E_{m\acute{a}x}} \tag{1}$$

Bajo determinadas condiciones constructivas puede suprimirse el factor 2 del numerador.

La gran ventaja del SiC es el hecho de que soporta una intensidad de campo eléctrico $E_{m\acute{a}x}$ aproximadamente 10 veces más alta que el Si¹⁾. Por consiguiente, el espesor requerido por un elemento de SiC para una tensión dada no es que más que un décimo que el de el correspondiente elemento de Si.

La ecuación siguiente, conocida generalmente como ecuación de Maxwell, considera también la dotación del material se-

¹⁾ Para simplificar, en esta representación se admite que la intensidad de campo $E_{m\acute{a}x}$ es constante, aunque de hecho depende tanto de la dotación como de la temperatura. El error resultante es relativamente pequeño.

miconductor, es decir, el contenido comandado de los centros de recombinación:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{qN_d^+}{\epsilon_0} \tag{2}$$

En esta ecuación ϵ representa la densidad de carga de espacio, ϵ_0 la permitividad, q la constante eléctrica de campo, q la carga elemental y N_d^+ la concentración del donante ionizado. Se admite que la tensión queda bloqueada por una capa n , débilmente dotada, como sucede en la mayor parte de los componentes Si y SiC.

Admitiendo un valor constante de la dotación y combinando las ecuaciones (1) y (2) se obtiene:

$$N_d^+ < \frac{\epsilon_0 E_{m\acute{a}x}^2}{2qU_b} \tag{3}$$

Para una tensión de ruptura dada y con una intensidad de campo 10 veces más alta, como se puede conseguir con el SiC, la dotación de la capa conductora puede ser aproximadamente 100 veces mayor que en el Si.

Los MOSFET SiC tienen pérdidas bajas en estado de conducción

Un MOSFET es el semiconductor de potencia con mejores propiedades, tanto para el diseñador de circuitos eléctricos como para el usuario final **2**. Como ya se ha mencionado, los MOSFET no han sido aplicados hasta ahora más que para tensiones de ruptura de hasta algunos cientos de voltios. La ecuación siguiente es una de las posibles explicaciones de este hecho:

$$r_{ds,on} = \frac{4U_b^2}{\mu \epsilon_0 E_{m\acute{a}x}^3} \tag{4}$$

En esta ecuación, $r_{ds,on}$ representa la resistencia específica (en Kcm^2) de la capa de barrera, denominada también campo interno de un MOSFET vertical. La resistencia aumenta con la anchura del campo de desplazamiento y disminuye al incrementarse la dotación, ya que es mayor el número de portadores de carga que transportan la corriente. El símbolo μ designa la movilidad de estos portadores de carga, normalmente electrones.

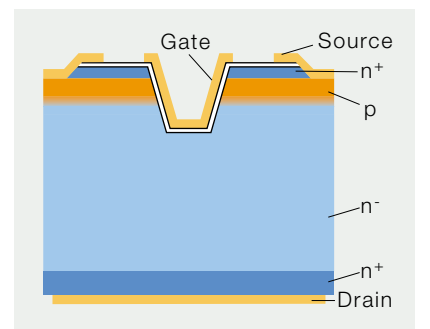
Según la ecuación (4), la resistencia en el campo de desplazamiento del MOSFET

aumenta con el cuadrado de la tensión de ruptura. Con el Si se consiguen valores de resistencia demasiado altos ya con tensiones de ruptura de unos pocos cientos de voltios. Además, la resistencia disminuye según la tercera potencia del campo crítico. Puesto que la intensidad crítica de campo del SiC es aproximadamente 10 veces más alta que la del Si, las pérdidas de los MOSFET SiC en estado de conducción son mucho menores que las de los correspondientes componentes Si. Esto es válido al menos en la gama de potencias en que el campo de desplazamiento domina las pérdidas en estado de conducción. Esto puede aplicarse a todos los componentes llamados unipolares, en los cuales sólo se utiliza un portador de carga para el transporte de corriente, es decir, para los MOSFET, los JFET (Junction Field Effect Transistors) y para los diodos Schottky.

Componentes bipolares para tensiones de ruptura mayores

Puesto que no pueden utilizarse las estructuras MOSFET a base de Si para tensiones de ruptura superiores a algunos cientos de voltios, el diseñador de circuitos de conmutación en el dominio de tensiones más altas debe acudir al uso de elementos bipolares. Como puede verse en la ecuación (3), la resistencia está limitada por el número de portadores de carga N_d^+ disponibles. En los componentes bipolares, como los diodos pn, los

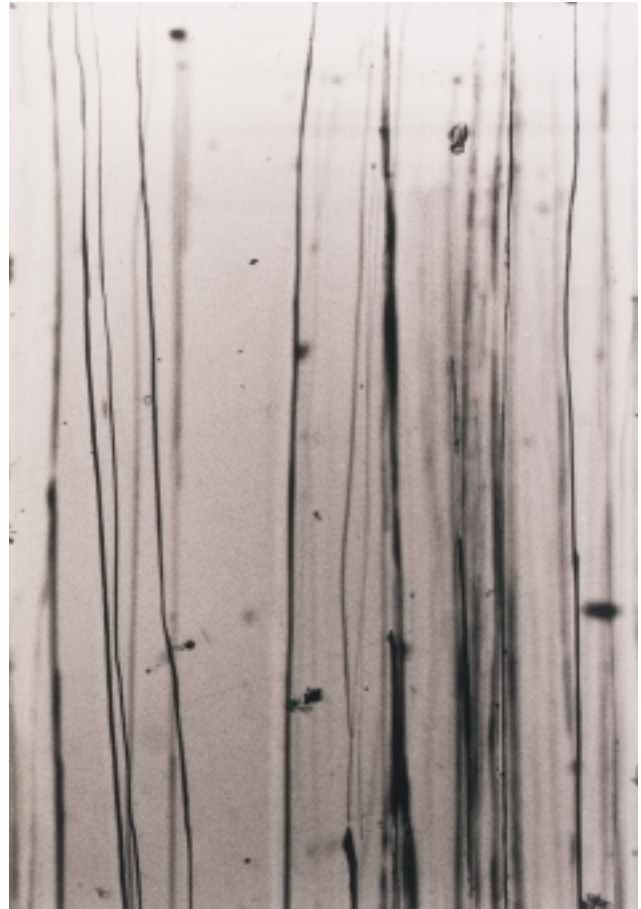
Estructura de un posible MOSFET basado en el SiC. La capa n- es la zona de bloqueo del componente y tiene una influencia importante sobre el comportamiento de conducción.





Substratos experimentales SiC (wafers) de distintas dimensiones con estructura de diodos

(Fotografía: IMC)



3 Toma microscópica de los microtubos (líneas oscuras) que atraviesan un sustrato.

Estos defectos tienen un diámetro de cerca de 1 μm.

(Fotografía: Universidad de Linköping)

IGBT y los GTO, la conexión del elemento aumenta el número de portadores de carga por inyección, realizada por los emisores de ánodo y cátodo. Las pérdidas en estado de conducción son mucho menores que con las estructuras MOSFET. El cátodo inyecta electrones y el ánodo huecos. La corriente, por tanto, está transportada tanto por electrones, cargados negativamente, como por huecos, con carga positiva, de donde viene la expresión *bipolar*.

Una inyección bipolar de portadores de carga tiene, sin embargo, el inconveniente de que en la desconexión es necesario eliminar el exceso de carga, antes de que el componente pueda volver al estado de no conducción. Esta eliminación se realiza con una corriente en sentido inverso y con la llamada recombinación, es decir, neutralización mutua de electrones y huecos.

El tiempo necesario para eliminar el exceso de portadores de carga no es despreciable en modo alguno. Durante este intervalo, la tensión y la corriente pueden alcanzar simultáneamente valores muy altos, lo que aumenta notablemente las pérdidas de conmutación. La ventaja de tener pérdidas relativamente bajas en estado de conducción ha de conseguirse, por tanto, al precio de unas pérdidas de conmutación bastante altas.

Es evidente que en los MOSFET y en otros componentes unipolares también hay que eliminar el exceso de portadores de carga, pero las pérdidas suelen ser mucho menores que en los componentes bipolares.

El valor total de la carga específica inyectada q_{inj} tiene el valor siguiente:

$$q_{inj} = J \mu \quad (5)$$

J es la densidad de corriente y μ la llamada vida útil de los portadores minoritarios, es decir, el tiempo medio necesario para la recombinación de un electrón y de un hueco. La vida útil de los semiconductores de potencia depende de la concentración de centros de recombinación. Esta concentración viene fijada por el fabricante, que procura encontrar un compromiso razonable entre las pérdidas de conducción y de conmutación para cada tipo de semiconductor en función del campo de aplicación.

Tiristores bipolares de SiC para tensiones superiores a 10 kV

Como ya se ha mencionado, el diseñador de circuitos de conmutación utiliza componentes bipolares sólo si la tensión de

servicio es demasiado alta para los componentes unipolares (MOSFET y diodos Schottky). En el futuro, el uso de SiC en las estructuras MOSFET y en los diodos Schottky permitirá alcanzar una tensión de ruptura mucho más alta que con el Si. Por tanto, previsiblemente se emplearán estructuras MOSFET en la mayoría de aplicaciones. Esto es válido especialmente para las tensiones de servicio de hasta varios kilovoltios.

En numerosas aplicaciones, por ejemplo en la compensación de la potencia reactiva y en las líneas CCAT, las tensiones de servicio son mucho mayores que la mayor tensión de ruptura que puede conseguirse con los mejores materiales disponibles para semiconductores. En estos casos, la única solución sigue siendo conectar componentes en serie.

Se ha elegido la tensión de ruptura de los componentes buscando un equilibrio óptimo entre las pérdidas y el comportamiento del sistema. Los tiristores destinados a estas aplicaciones tienen una tensión de ruptura típica de 6 a 7 kV. Esta tensión es un compromiso entre los costes, los datos técnicos y las pérdidas en los estados de conducción y de conmutación. Con tensiones de ruptura tan altas se necesita un espesor de capa de cerca de 1 mm y una vida útil de los portadores de carga de 100 μ s aproximadamente, lo que tiene como consecuencia unas pérdidas de conmutación elevadas.

Con el SiC, la tensión de ruptura de los componentes de este campo de aplicación será seguramente más alta. Es posible concebir componentes para tensiones de ruptura superiores a los 10 kV. La vida

útil de los portadores minoritarios deberá estar entonces entre 1 y 10 μ s, lo que permitirá un comportamiento de conmutación adecuado.

Los componentes de SiC dominan temperaturas mucho más altas

Para los componentes de potencia bipolares basados en el Si se recomienda en general una temperatura de servicio inferior a 125 °C, mientras que los componentes unipolares, como los MOSFET, pueden utilizarse hasta una temperatura de 150 °C. Desde el punto de vista físico, estos límites se explican por las altas corrientes de fuga, que provocan temperaturas más altas en dirección contraria en las transiciones pn bloqueadoras, de modo que aumenta mucho el riesgo de «avalanchas

El crecimiento epitaxial sobre el carburo de silicio se produce, por calefactado de alta frecuencia, a temperaturas cercanas a 1500 °C. (Fotografía: IMC)

5



térmicas». Puesto que la vida útil de los portadores de carga es más prolongada, pueden presentarse procesos parásitos destructivos. Al fin y al cabo, una reducida movilidad puede también causar pérdidas en los componentes unipolares en estado de conducción. Evidentemente, la temperatura de servicio debe ser menor que la temperatura a la cual el material semiconductor pasa al estado de conductibilidad intrínseca, es decir, cuando la densidad de los portadores de carga no depende ya de la dotación sino del intervalo de energía entre dos bandas del material semiconductor. Por encima de este límite se pierde la capacidad de comandar la corriente y de bloquear la tensión. Para el Si esta temperatura es del orden de 300 °C.

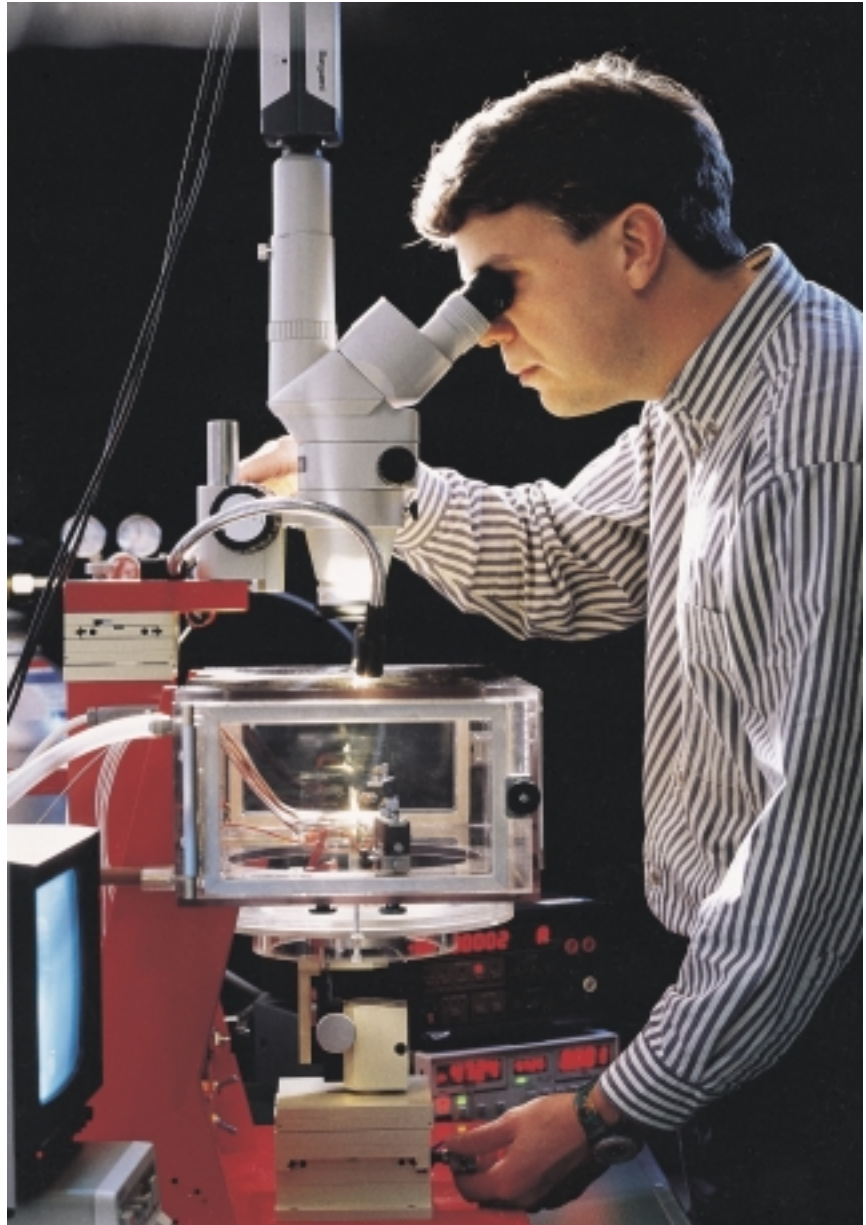
Por el contrario, los componentes a base de SiC pueden utilizarse a temperaturas mucho mayores. Las corrientes de fuga de las transiciones pn son muy pequeñas, de modo que es posible bloquear la tensión incluso a temperaturas muy superiores a 300 °C. El límite de conductibilidad intrínseca no se alcanza hasta muy por encima de los 1000 °C.

A título de ejemplo, mencionemos que un grupo de investigación norteamericano ha utilizado un MOSFET a base de SiC a una temperatura de 650 °C. Esta alta capacidad de carga térmica permitirá ciertamente conseguir algunos perfeccionamientos en los sistemas de la electrónica de potencia. Sin embargo, hay que mencionar que las bajas pérdidas mencionadas son válidas para las temperaturas de servicio y para las densidades de corriente usuales en los semiconductores a base de silicio.

¿Por qué no se dispone aún de componentes SiC?

Las ventajas de los componentes SiC se conocen ya desde los años 60. El hecho de que aún no se disponga de componentes SiC es debido a dificultades de tipo tecnológico. Hasta ahora, este material ha sido utilizado industrialmente sólo como abrasivo, generalmente bajo el nombre de carborundo.

No es posible fundir el SiC a presiones dominables; al alcanzar el punto de fusión, en torno a los 2500 °C, pasa directamente al estado gaseoso. El cristal, por tanto, ha



Medida microscópica de la tensión de ruptura de un diodo SiC en gas SF₆

(Fotografía: IMC)

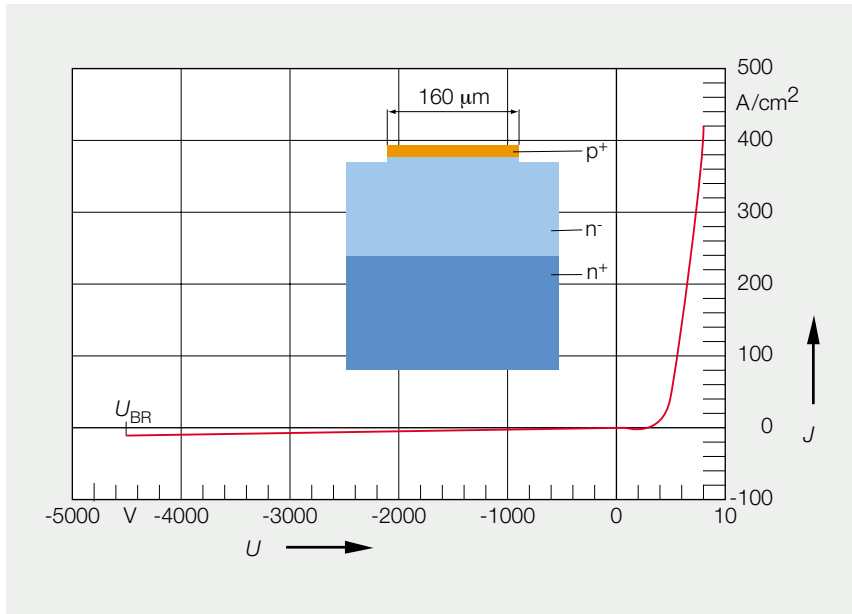
6

de ser construido a partir de la fase gaseosa, lo cual es mucho más difícil que con el silicio, que tiene un punto de fusión de unos 1400 °C.

Uno de los mayores obstáculos para que la técnica del SiC alcance la madurez es la dificultad de encontrar un sustrato (material soporte) de gran calidad para fabricar comercialmente los elementos semiconductores. Antes de comenzar la producción es necesario, al igual que para los semiconductores de silicio, disponer de un sustrato monocristalino (wafer). A

finales de los setenta se desarrolló un procedimiento para fabricar sustratos de SiC de gran superficie **3**. Estos sustratos, fabricados con el método de Lely modificado, tienen sin embargo algunos defectos graves, designados por el término microtubos **4**.

Como ya se ha podido comprobar, un único microtubo a través de una transición pn de alta tensión puede anular totalmente la capacidad de bloqueo de la tensión. En los últimos tres años se ha conseguido reducir la densidad de estos defectos desde



Característica corriente-tensión y esquema de configuración de un diodo de prueba basado en SiC, con una tensión de ruptura de 4,5 kV

J Densidad de corriente
 U Tensión
 U_{BR} Tensión de ruptura

p^+ Emisor, $1,5 \mu\text{m}$, $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
 n^- Base, $45 \mu\text{m}$, $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
 n^+ Substrato

varios miles hasta 50–100 defectos por centímetro cuadrado. A pesar de estas mejoras, el tamaño de los componentes sigue estando limitado a unos pocos milímetros cuadrados para simplemente conseguir un rendimiento de unos pocos tantos por ciento. Por tanto, la tensión máxima admisible por componente está limitada a algunos amperios. Para que los semiconductores de potencia de SiC puedan llegar a ser una realidad comercial, es necesario avanzar más en la tecnología de substratos.

Investigación en el campo del carburo de silicio

ABB es una de las empresas líder en el desarrollo de esta nueva técnica. En ABB la investigación está concentrada en los procedimientos de fabricación de componentes. Entre ellos hay que mencionar el grabado, el depósito de capas de aislamiento, la oxidación, la metalización y la elaboración de contactos. Al contrario de lo que sucede en la tecnología Si, una gran parte del material SiC utilizado por los

fabricantes de componentes para producir estructuras semiconductoras está fabricado por ellos mismos y no por los suministradores de substratos. Esto se debe al hecho de que la dotación, es decir, la introducción controlada de centros de recombinación, no es practicable a alta temperatura en el SiC. Por tanto, los centros de recombinación se inyectan durante la epitaxia del material. En caso de estructuras muy planas, inclusive para las capas de contacto, se pueden inyectar iones como se hace en el silicio.

Conjuntamente con sus asociados en la investigación, la Universidad de Linköping, Suecia, y el Centro de Microelectrónica Industrial de Estocolmo (IMC), **5** y **6**, ABB ha conseguido ya algunos éxitos de gran importancia en el dominio de los componentes SiC de alta tensión.

Récord mundial en los diodos de carburo de silicio

Los trabajos de investigación han conducido, entre otras cosas, al desarrollo de un diodo SiC que, debido a su tensión de

ruptura de 4,5 kV, ha superado todas las marcas conseguidas hasta ahora **7**. Este récord es más que el doble que la marca anterior.

Una parte importante de este resultado se debe a la calidad del material epitaxial. Los procedimientos desarrollados por la Universidad de Linköping han proporcionado capas que, con un espesor de 90 μm y una pureza de dotación residual inferior a $10^{14}/\text{cm}^3$, superan todos los resultados conseguidos hasta el momento. Como ya se ha mencionado, el espesor y la pureza del material son factores fundamentales para la fabricación de componentes de alta tensión de alta potencia.

Hasta fechas recientes, los medios profesionales tenían la opinión de que la vida útil de los portadores de carga minoritarios está limitada a valores menores que 100 ns. El diodo de 4,5 kV mencionado tiene una vida útil de portadores de carga de alrededor de 0,5 μs . En algunos ejemplares se han observado valores incluso más elevados.

Aunque ya se han conseguido numerosos avances, la fabricación comercial de semiconductores de SiC exige aún un intenso trabajo de investigación y desarrollo. Por ejemplo, habría que estudiar con más detalle los problemas relacionados con la pasivación de las superficies, además de la mejora de calidad de las superficies de corte MOS, puesto que ambos son dos factores críticos de los MOSFET de potencia.

Dirección del autor

Dr. Karl Bergman
 ABB Forschungszentrum
 S-72178 Västerås, Suecia
 Telefax: +46 (0) 21 32 32 64