

Estado actual de la tecnología: el Si y sus competidores, SiC y GaN.

El material semiconductor mas usado en este momento para fabricar dispositivos electrónicos de control de potencia es el Silicio (Si), que en los 60s desplazó completamente al Germanio (Ge) y casi completamente a los tubos de vacio, y desde entonces representó prácticamente el 100% del mercado hasta principios de este siglo.

Las razones del triunfo del Si fueron:

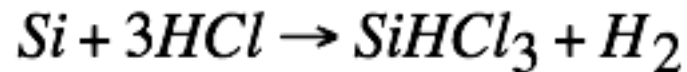
- 1.- Permitted aplicaciones que antes eran imposibles.
- 2.- Resultó mas confiable.
- 3.- Resultó mas sencillo de usar.
- 4.- Resultó mas económico.

El Si es un elemento muy abundante en la naturaleza, que representa el 15,1% de la masa de la Tierra, y sus compuestos, los silicatos están entre los mas abundantes; para propósitos electrónicos la materia prima es la sílice u óxido de silicio (SiO_2), a partir del cual se producen los cristales de Si puro que son la base de la industria actual de semiconductores.

El proceso de fabricación de los cristales de Si ultrapuros es el siguiente:

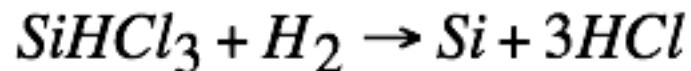
1.- Preparación del Si "metalúrgico" a partir de la sílice pura: El SiO_2 se reduce a Si por aplicación de calor en un horno con carbono, generando Si puro y CO_2 .

2.-Purificación por destilación: El Si producido en el paso anterior se ataca con ácido clorhídrico para producir triclorosilane, que es líquido a temperatura ambiente.



El líquido resultante, que contiene contaminantes en la forma de cloruros, entre otros de hierro y cobre, se somete a un proceso de destilación fraccionada para obtener triclorosilane del nivel de pureza requerido.

3.-Producción de Si policristalino puro, por reducción térmica del triclorosilane en atmósfera de hidrógeno:



4.-Crecimiento del monocristal de Si a partir del Si policristalino.

Esto se hace por uno de dos métodos.

a.-El método de Czochraiski es el mas usado; en el se parte de un crisol que contiene Si puro y los dopantes requeridos para producir un cristal de Si tipo N o tipo P; la mezcla se funde por calentamiento por radio frecuencia en atmósfera pura de argón a una temperatura de 1500°C (la temperatura de fusión del Si es 1450°C), con un actuador el crisol de mantiene en rotación lenta y, con otro actuador, se extrae lentamente el cristal de Si que se cristaliza a partir de un cristal semilla que tiene las características cristalográficas necesarias.

Por este método se pueden producir monocristales de Si tipo N o tipo P de mas de 300mm (12") de diámetro y 250kg de peso.

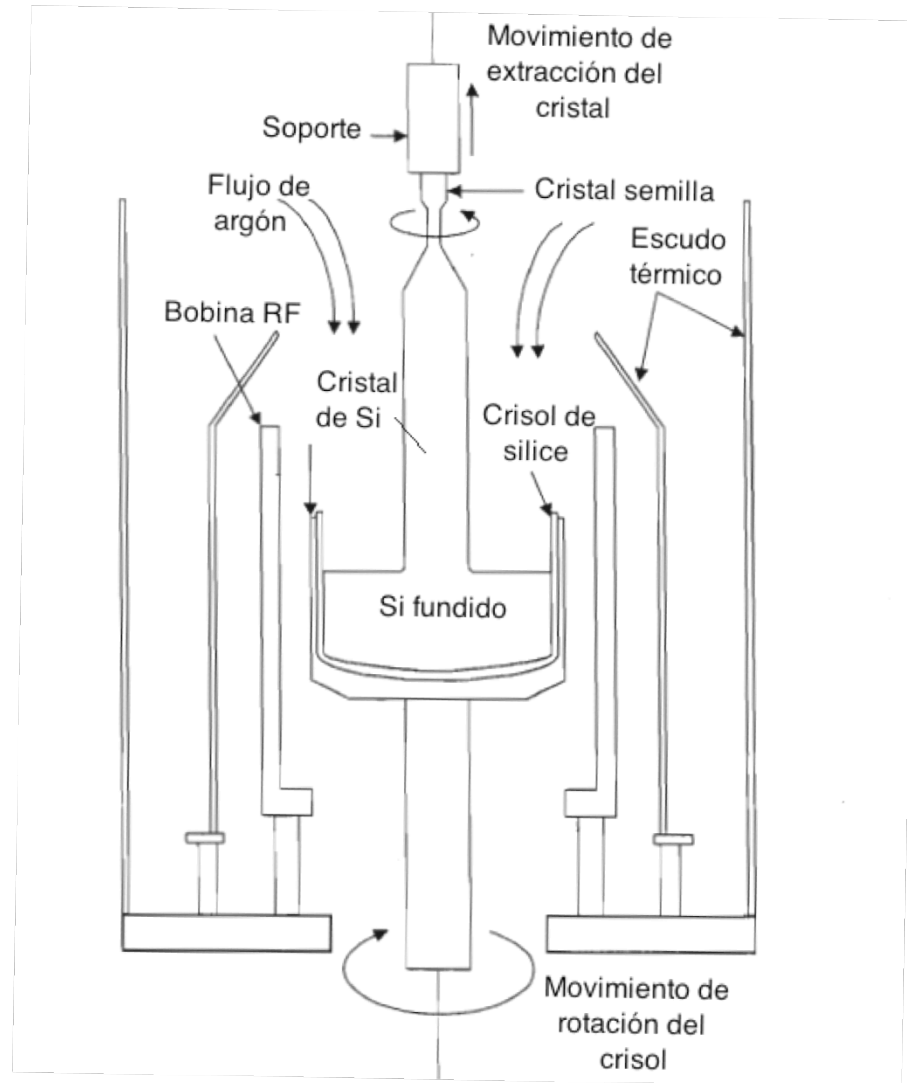


Diagrama del método de Czochralski.



Cristal de Si crecido por el método Czochralski.

b.- El método de la "zona de flotación" (Float Zone).

En este método se parte de una barra de Si policristalino del diámetro deseado en cuyo extremo inferior se une un cristal de Si de la orientación cristalográfica requerida, que actúa como cristal semilla. El arreglo se introduce en el centro de una bobina de radiofrecuencia colocada en una cámara de llena de un gas inerte, y se hace rotar lentamente; a continuación se energiza la bobina de radio frecuencia que produce un calentamiento localizado que va fundiendo la barra desde el punto de contacto con el cristal semilla, la bobina se desplaza lentamente hacia arriba, fundiendo nuevo material a medida que el material ya fundido se recristaliza.

El dopante (PH_3 para el fósforo o B_2H_4 para el boro se introduce como gas en la atmósfera de la cámara; por este método se pueden obtener monocristales de tipo P o N de hasta 150mm (6") de diámetro.

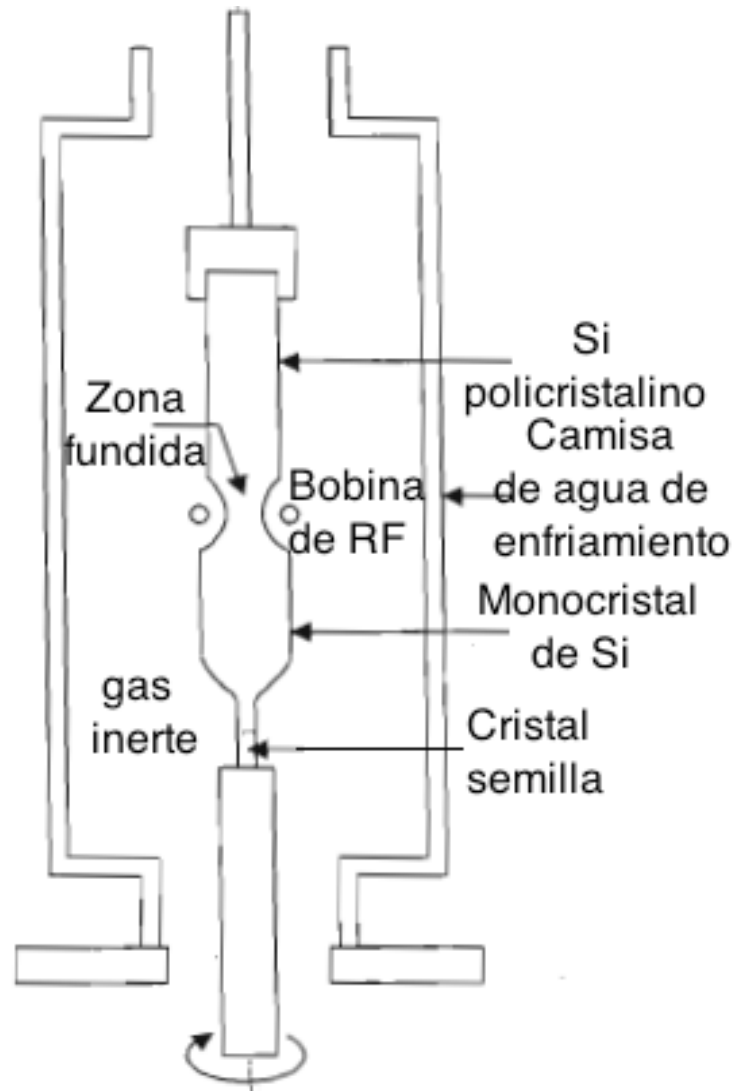
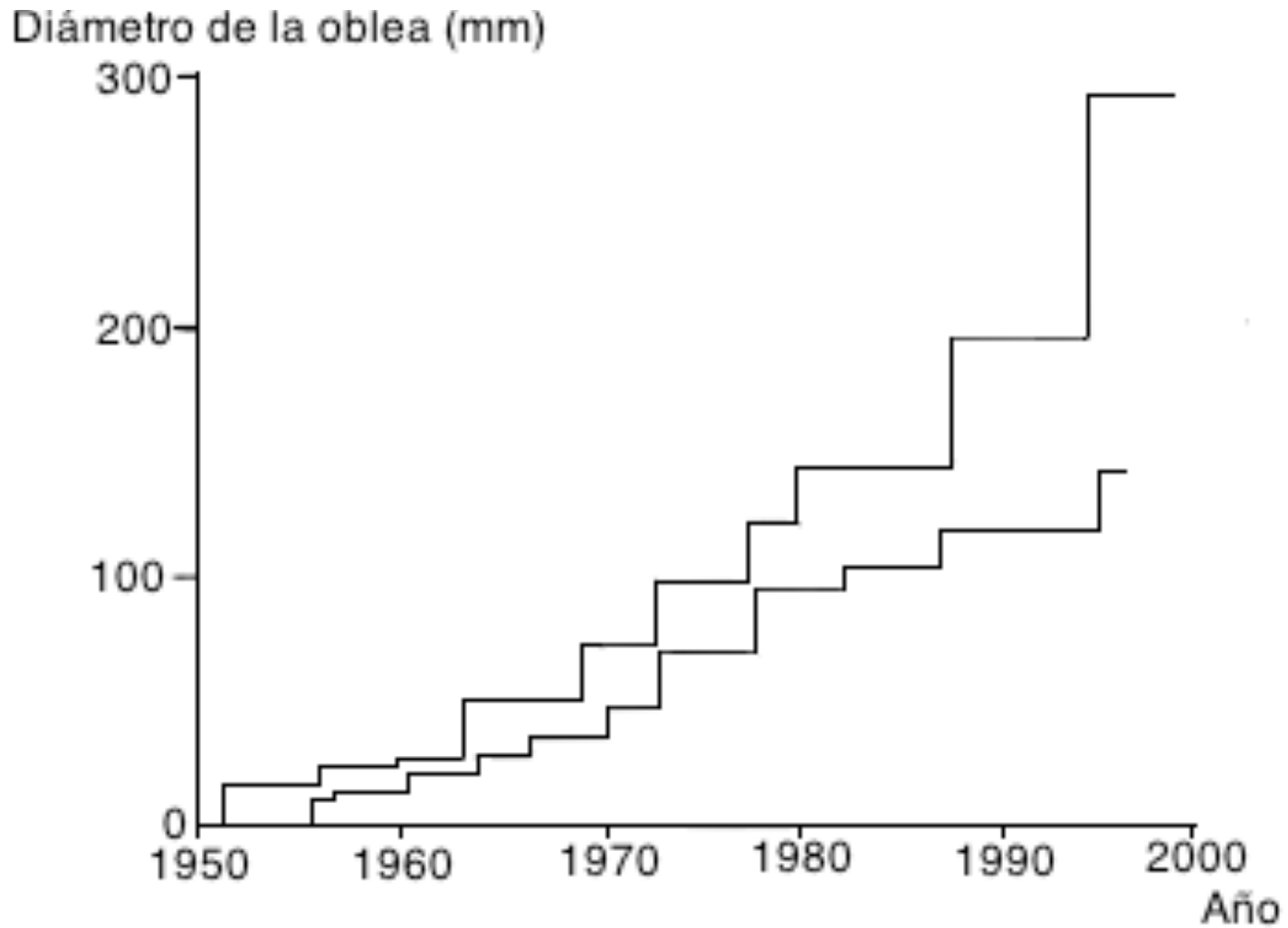


Diagrama del método de zona de flotación.



Crecimiento anual del diámetro de los monocristales de Si producidos por los métodos de Czochralski y de zona de flotación

Desde su comienzo a mediados de los 50s el método de Czochralski ha demostrado mayor capacidad de crecimiento que el de zona de flotación; y el objetivo actual de los desarrolladores de equipos de fabricación de monocristales de Si es superar los 400mm de diámetro en las obleas producidas por el método de Czochralski.

Aunque la dominación de la tecnología de Si era absoluta al principio del presente siglo, la situación está cambiando, y tras muchos años de investigación en posibles materiales alternativos, actualmente ya se está trabajando en la producción y mercadeo de dispositivos electrónicos de control de potencia fabricados con dos nuevos materiales, el Carburo de Silicio (SiC), principalmente en una de sus configuraciones cristalinas (4H-SiC) y el Nitruro de Galio (GaN).

Ambos son semiconductores de mayor separación entre las bandas de conducción y de valencia, lo que se conoce como "materiales de banda ancha" ("wide band gap materials"), con una separación unas tres veces mayor que la del silicio, además de superarlo en otras características técnicas.

Tal como en su momento pasó con el Si, los nuevos materiales ofrecen la posibilidad de nuevas aplicaciones, y de tener mayor confiabilidad, pero es indudable que el Si sigue siendo con ventaja el más barato y fácil de fabricar y que la base de conocimientos asociados con el Si es muy importante; queda por demostrarse si los nuevos materiales producirán dispositivos más fáciles de aplicar y hasta que punto el diferencial de precios podrá ser reducido.

Tanto el Si como sus competidores presentan 4 electrones libres en su capa de valencia. En el estado actual de la tecnología los elementos funcionales de los dispositivos electrónicos de estado sólido se fabrican definiendo distintas regiones en el cristal semiconductor, cada una de ellas caracterizada por un nivel específico de átomos dopantes incluidos para adecuar las propiedades eléctricas de cada región a la función que le corresponda en el dispositivo.

Se pueden definir tres tipos de regiones:

- Las intrínsecas, I o Ni, donde el cristal es puro, sin átomos dopantes.

- Las tipo N, que tienen un exceso de electrones, portadores de carga negativa (n), aportados por "átomos dopantes" con 5 electrones de valencia que remplazan a algunos de los átomos intrínsecos en esa región del cristal.
- Las tipo P, que tienen un déficit de portadores tipo n, ya que están infiltradas con "átomos dopantes" de elementos con 3 electrones en su banda de valencia remplazan a algunos de los átomos intrínsecos en esa región del cristal; en general la ausencia de un electrón se designa como la presencia de un "hueco", que se considera como el portador de una carga positiva (tipo p).

La intensidad de los dopados N y P se mide en relación con la concentración intrínseca de portadores en el cristal puro, n_i .

Para el Si la concentración intrínseca de portadores es:

$$n_i \approx 3,87 * 10^{16} T^{\frac{3}{2}} e^{-\left(\frac{7,02 * 10^3}{T}\right)}$$

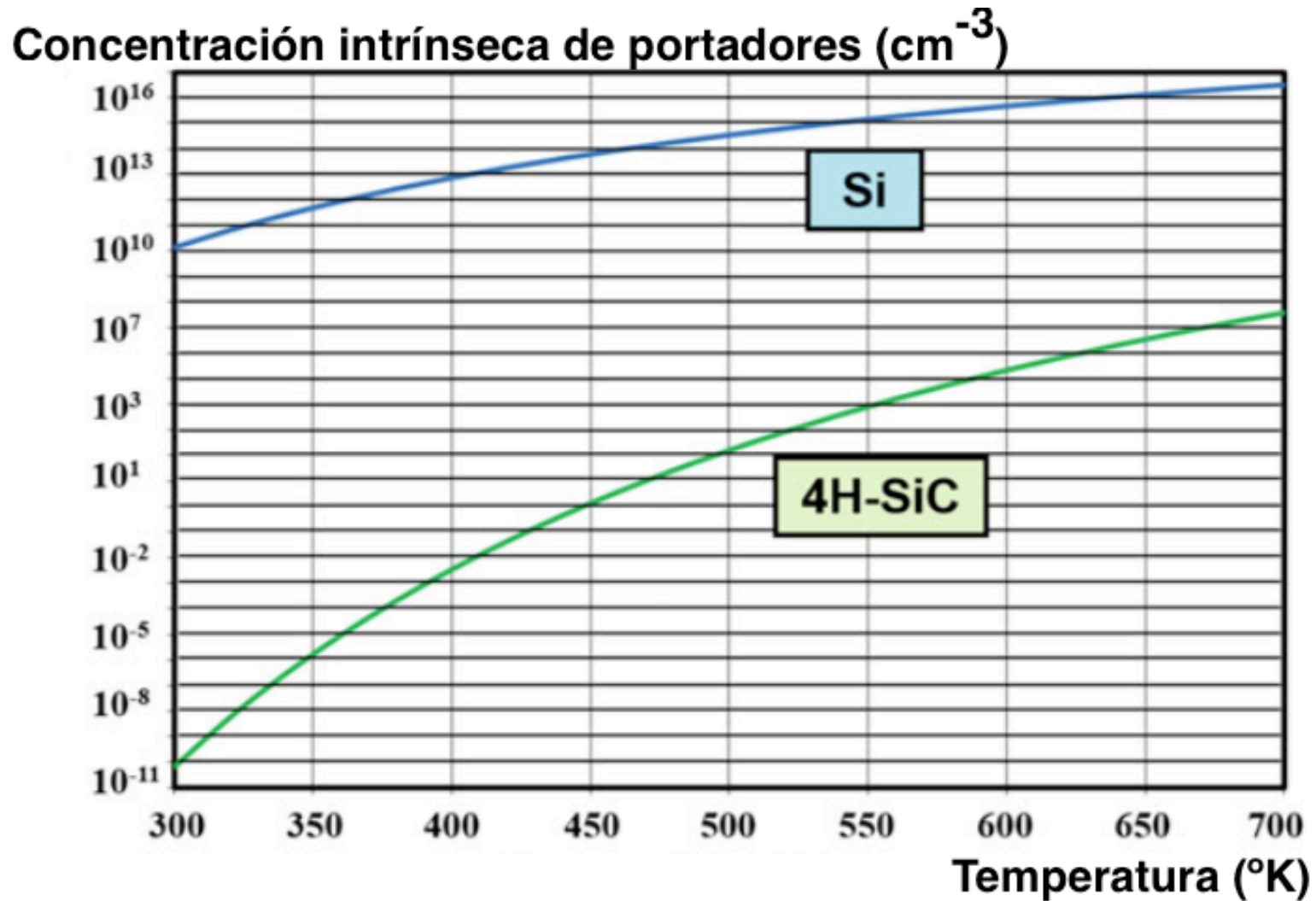
Por comparación, la densidad de potadores en el 4H-SiC es:

$$n_i \approx 1,70 * 10^{16} T^{\frac{3}{2}} e^{-\left(\frac{2,08 * 10^4}{T}\right)}$$

Evaluando para la temperatura ambiente de referencia (300°K), resulta que la concentración intrínseca de portadores del Si es del orden de $1,4 * 10^{10}$ portadores libres por cm^{-3} , y la del 4H-SiC del orden de los $6,7 * 10^{-11}$ portadores libres por cm^{-3} , mas de veinte órdenes de magnitud menor.

Esto significa que los portadores intrínsecos solo representan un aporte insignificante a la corriente de fuga en el del 4H-SiC, mientras que son importantes en el Si.

No solo eso, sino que para el Si el crecimiento de la concentración de los portadores intrínsecos con la temperatura es mucho más rápido, lo que obliga a operar a temperaturas relativamente moderadas.



Concentración intrínseca de portadores vs. temperatura, para Si y SiC.

Comparación entre los parámetros básicos de interés electrónico del Si, el Carburo de Silicio en su forma 4H-SiC, el Nitruro de Galio y el diamante (C tetraedro).

Parámetro	Si	4H-SiC	GaN	Diamante
Energía ente bandas, E_g , eV	1,12	3,26	3,39	5,45
Intensidad de campo de ruptura E_c , MV/cm	0,23	2,2	3,3	10
Movilidad del electrón, μ_n , cm/s	1,400	950	1,500	1000
Velocidad de deriva, v_{sa} , cm/s	10^7	$2 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^7$

Constante dieléctrica, ϵ_r	11,8	9,7	9,0	5,5
Conductividad térmica, λ , W/cm°K	1,5	3,8	1,3	22
Figura de mérito de Baliga (absoluta) MW/cm ²	42	$2 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^3$	$9,7 \cdot 10^5$
Figura de mérito de Baliga (relativa al Si)	1	550	190	23.000

Efecto de la diferencia de los parámetros eléctricos de interés.

- 1.- Mayor separación entre las bandas implica menor corriente de fuga en igualdad de condiciones de temperatura de juntura, y mayor temperatura máxima de operación.
- 2.- El campo eléctrico de ruptura, E_{crit} , se relaciona directamente con la tensión de ruptura, V_{BR} ; la relación se puede aproximar como:

$$V_{BR} \approx \frac{1}{2} w_{drif} E_{crit}$$

Donde w_{drif} es el ancho de la región de deriva del dispositivo.

Esto implica que, a igualdad de espesor, un componente de mayor campo crítico bloqueará un voltaje proporcionalmente mayor, y que, a igualdad de voltajes de ruptura, el componente de mayor campo crítico podrá tener un espesor mucho menor (en estos casos del orden de 10 veces menor), lo que implica que tendrá también pérdidas menores.

Por otra parte, para soportar el campo eléctrico debe haber portadores en la región de deriva que van siendo desplazados hasta que se alcanza el valor del campo crítico. Asumiendo como ejemplo el caso de la región N, el número de electrones puede ser aproximado como:

$$qN_D = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{E_{crit}}{w_{drift}}$$

Donde q es la carga del electrón, $1,6 \times 10^{-19}$ coulombs, N_D es el número total de electrones en el volumen considerado, ϵ_0 es la permitividad del vacío ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m) y ϵ_r es la permitividad relativa del cristal que, en condiciones DC, es equivalente a la constante dieléctrica del cristal.

Evidentemente, si el campo crítico del cristal, E_{crit} es 10 veces mayor en los nuevos materiales, y los terminales eléctricos pueden estar 10 veces más cerca, el número de electrones puede ser 100 veces más grande, lo que da una ventaja fundamental a los nuevos materiales en la capacidad de corriente:

Debe sin embargo señalarse que estos valores no son necesariamente alcanzables en un dispositivo real, puede haber otros problemas que los limiten, por ejemplo la necesidad de mantener un espesor mínimo en la oblea por razones mecánicas.

3.- Resistencia en conducción ($R_{DS(on)}$)

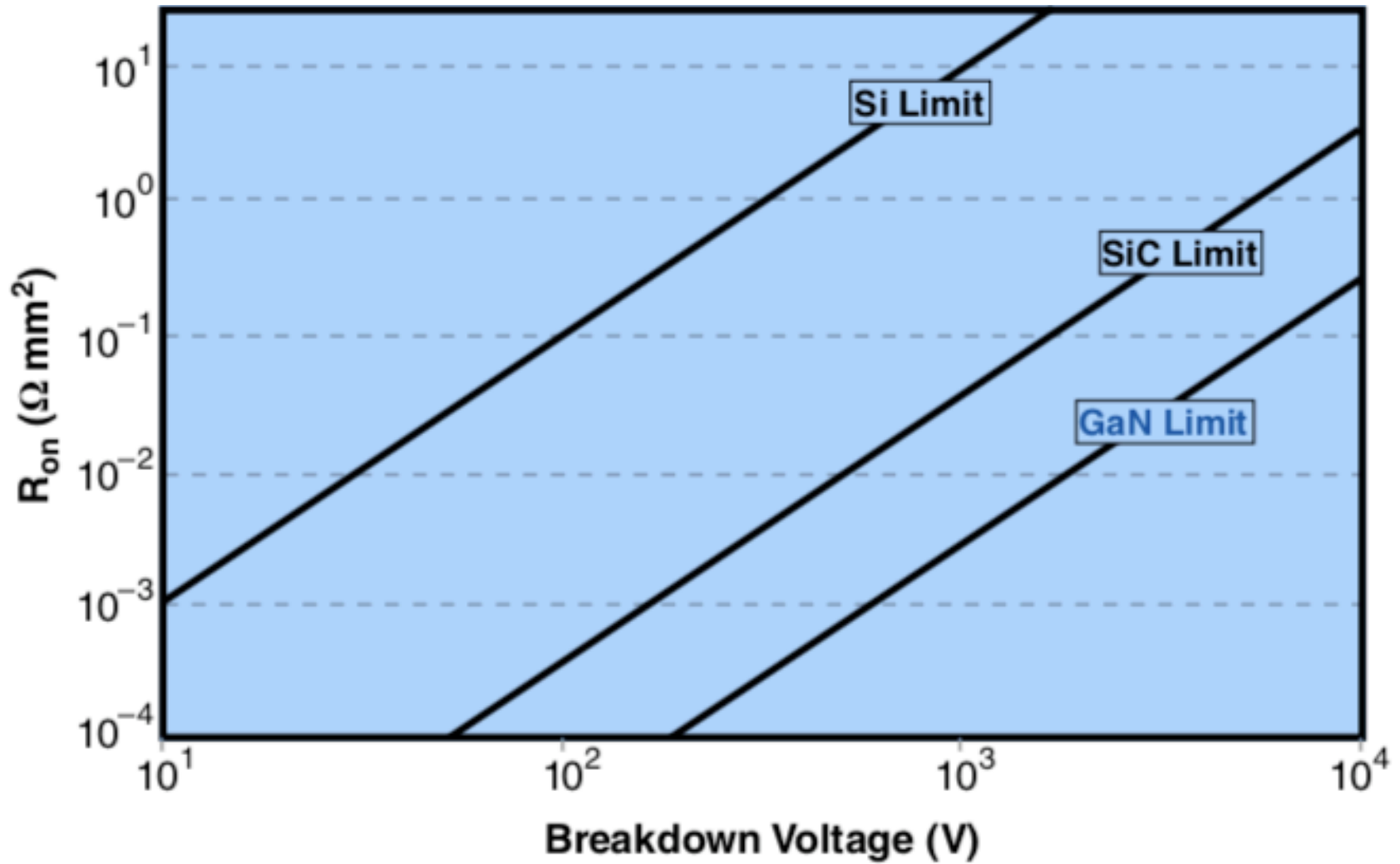
En los dispositivos de conducción por portadores mayoritarios, la resistencia en conducción viene dada por:

$$R_{DS(on)} = 4 \frac{V_{BR}^2}{\epsilon_0 \epsilon_r E_{crit}^3}$$

Por supuesto esta ecuación permite calcular el valor mínimo posible en teoría, pero existen numerosos factores que deben ser resueltos antes de que se alcance ese límite inferior.

En los MOSFETs de Si el desarrollo tardó unos 30 años.

Hay que esperar para ver cuánto tardará en alcanzarse en los dispositivos implementados con los nuevos materiales.

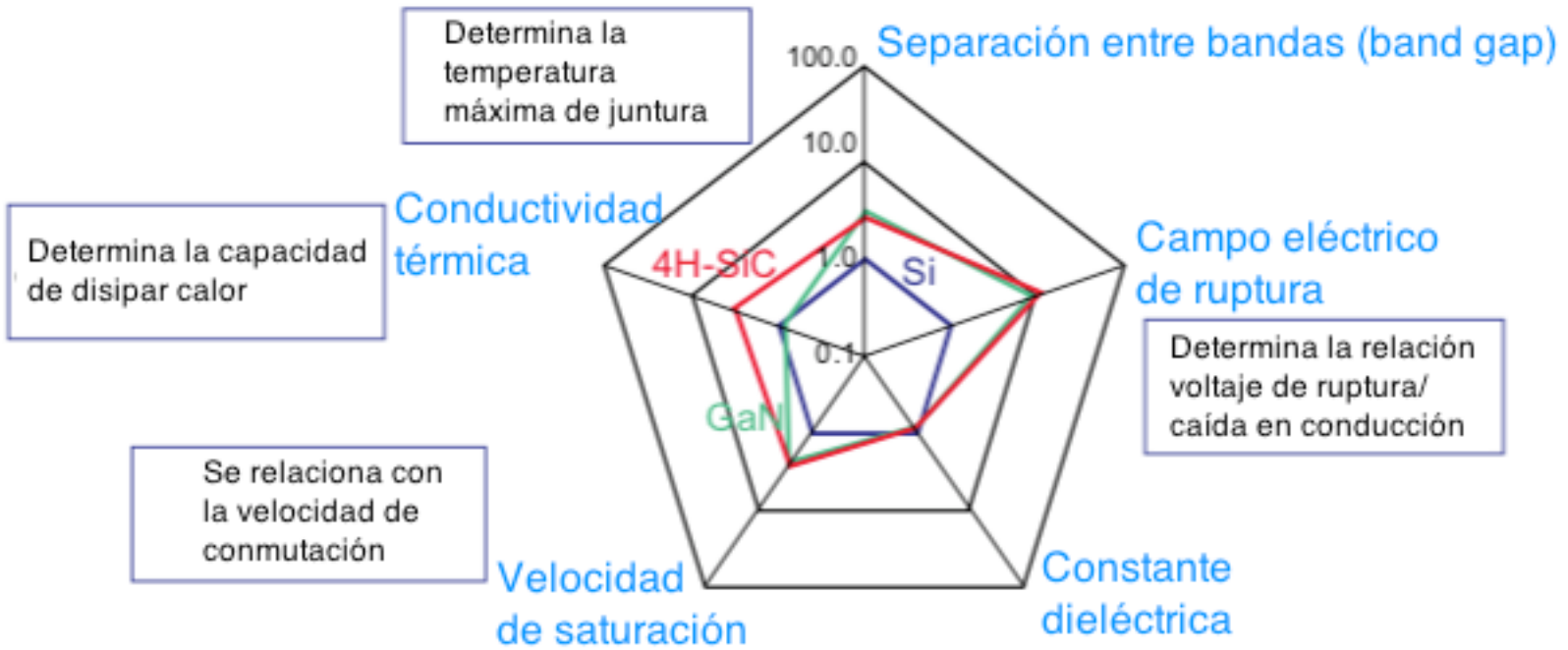


Relación R_{on} /tensión de ruptura límite para los tres semiconductores

4.- Figura de mérito de Baliga.

Este parámetro, introducido por B. Jayant Baliga, mide la densidad de potencia controlable en cada cristal, en MW/cm^2 en su forma absoluta, o en relación al Si, que es la tecnología dominante en la actualidad; evidentemente a mayor figura de mérito de Baliga menor es el tamaño del dispositivo requerido para controlar un nivel determinado de potencia o, a la inversa, dada un tamaño de dispositivo, a mayor valor de la figura de Baliga mayor será la capacidad de controlar potencia.

Los parámetros considerados son separación entre bandas, conductividad térmica, velocidad de saturación constante dieléctrica, campo eléctrico de ruptura.



Representación gráfica del efecto de los parámetros eléctricos de interés de los tres semiconductores considerados en las características finales de los dispositivos fabricados con ellos.

De la gráfica se observa que el 4H-SiC supera al Si en cuatro de los cinco parámetros, y es aproximadamente igual en el quinto (constante dieléctrica), que es el de menor importancia.

El GaN supera al Si en tres factores, y está igualado en constante dieléctrica y conductividad térmica.

Adicionalmente, su figura de Baliga relativa al Si es 190.

Por su parte el 4H-SiC supera la GaN en conductividad térmica, y básicamente lo iguala en los otros 4, y su figura de mérito de Baliga relativa al Si (550) es cerca de tres veces mejor.

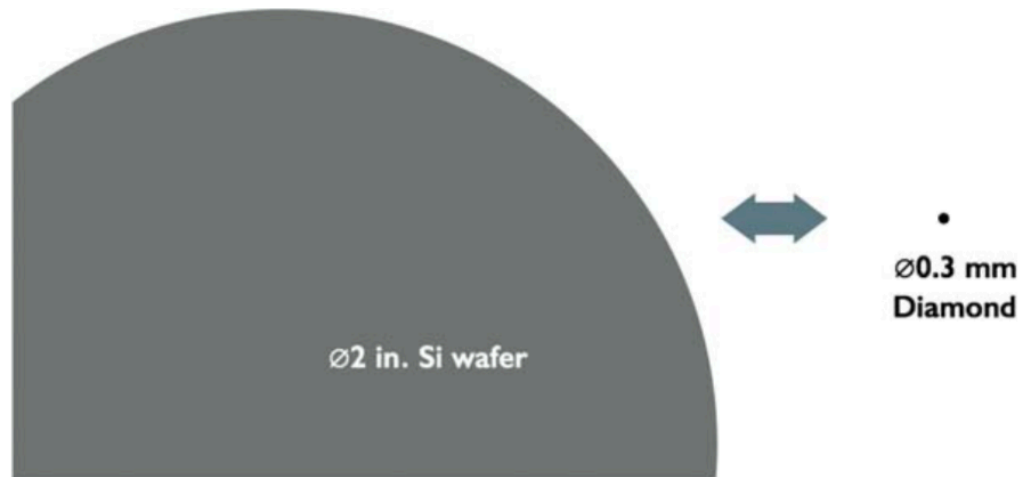
Aunque el diamante, C, es todavía demasiado experimental para estar incluido en la figura, sus posibilidades a futuro como un material para fabricar dispositivos electrónicos de control de

potencia no pueden ser ignoradas: supera a los otros tres en conductividad térmica, separación entre bandas y campo eléctrico de ruptura, lo que determina que su capacidad para manejar grandes niveles de potencia sea insuperable: su figura de mérito de Baliga relativa al Si (23.000) es 121 veces mejor que la del GaN y casi 42 veces mejor que la del SiC.

En estas condiciones, si la competencia fuese equilibrada desde los puntos de vista de igualdad de costos e igualdad de facilidad de fabricación, el Si quedaría rápidamente desplazado, mientras que en la competencia entre 4H-SiC y GaN casi no habría ventajas fundamentales, lo que debería llevar a segmentación del mercado en base a nichos específicos para dispositivos de alta velocidad, y el diamante sería (¿será?) el semiconductor dominante en el campo de las aplicaciones de potencia a frecuencias medias/bajas.

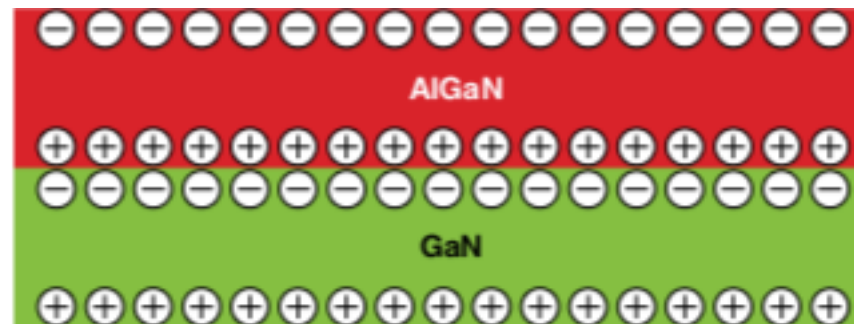
Tabla de comparación de parámetros obtenibles en la fabricación de un diodo de 1kV de tensión de ruptura fabricado en un área de 1cm²; valores calculados usando la mejor movilidad para cada semiconductor (μ_e o μ_p)

Parámetro	Si	SiC	GaN	Diamante
w_D (μm)	67	6,7	10	2
R_{ON} ($\text{m}\Omega$)	94	0,17	0,5	0,004



Comparación entre el área requerida para fabricar un diodo de 1kV de tensión de ruptura y 4m Ω de resistencia en conducción con Si (una oblea de 2" de diámetro) y con diamante (oblea de 0,3mm de diámetro).

Los dispositivos electrónicos de control de potencia implementados con Si o con 4H-SiC son dispositivos de conducción vertical, esto es la corriente se desplaza atravesando todo el espesor de la oblea del material que forma el dispositivo; los dispositivos electrónicos de control de potencia implementados con GaN hacen uso de un mecanismo de conducción que no existe en los otros dos, el "gas bidimensional de electrones", que es un fenómeno presente en la superficie del cristal, así que en estos dispositivos la corriente es solo superficial y todos los terminales están en la misma cara del dispositivo.



Gas bidimensional formado en la juntura entre la región AlGaN y la región GaN de electrones

Carburo de Silicio (SiC)

El carburo de silicio, SiC, es un material que se encuentra en la Naturaleza, pero es poco frecuente; fue estudiado por primera vez por I. J. Berzelius que definió sus propiedades físicas en 1824; sus propiedades de electro-luminescencia fueron definidas por H.J.

Round en 1907; el primer método práctico para sintetizar substratos monocristalinos de SiC fue descrito por Lely en 1955; con este método las dimensiones de los cristales producidos eran pequeñas y bastante aleatorias, pero la calidad estructural era muy buena, esto permitió difundir el uso del SiC como un elemento abrasivo importante en los procesos de maquinado de materiales resistentes, lo que fue la primera aplicación industrial importante del material.

Hace unos cincuenta años se reconoció que el SiC tenía propiedades posiblemente muy interesantes para aplicaciones electrónicas de estado sólido, y se inició una etapa de investigación intensa sobre el SiC en USA, URSS, Japón y Alemania.

Los trabajos se revivieron y expandieron en los 1980s, aprovechando nuevos descubrimientos importantes en el campo de las técnicas de fabricación capaces de ser aplicadas industrialmente.

Un impulso adicional fue proporcionado por el hecho de que la tecnología del Silicio estaba aproximándose al límite de su posible desarrollo en muchas aplicaciones.

Este "nuevo" material prometía:

- 1.- Reemplazar favorablemente al silicio en ciertas aplicaciones mejorando el rendimiento general del sistema.
- 2.- Expandir los campos de aplicación existentes.
- 3.- Dar origen a nuevas áreas de aplicación hasta entonces inaccesibles a dispositivos electrónicos de estado sólido.

Los primeros resultados prácticos a nivel de usuarios aparecieron en el mercado en 2000/2001 cuando Infineon (ahora Microsemi) presentó diodos Schottky de SiC capaces de operar a 600V y 12A.

Propiedades físicas del carburo de silicio.

Características estructurales.

La estructura mono cristalina del silicio se caracteriza por un arreglo de átomos de Si en una red cúbica centrada en las caras, con un espaciamiento de 5,431 Å.

Por su parte la estructura cristalina del SiC se puede describir como una pila de placas planas, cada placa formada por una capa plana de átomos de C sobre una placa plana de átomos de Si.

Cada pila se puede colocar sobre la inferior, en posiciones distintas entre si y distintas a la de la capa base; las tres posibles posiciones se conocen normalmente como A, B, C.

En base a la secuencia de apilación (por ejemplo: ABCB...) y a la recurrencia de la misma (por ejemplo: ABCBABCBA...), la red elemental puede ser cúbica (C), hexagonal (H) o romboidal (R).

Solo una dimensión de la retícula cristalina (la altura en la dirección [0001], perpendicular a los planos, que es el eje de crecimiento, eje c, es diferente de una pila a la otra.

Esto implica que pueden existir varios arreglos cristalográficos con la misma composición química, SiC, propiedad denominada politipismo (que es polimorfismo en una sola dimensión).

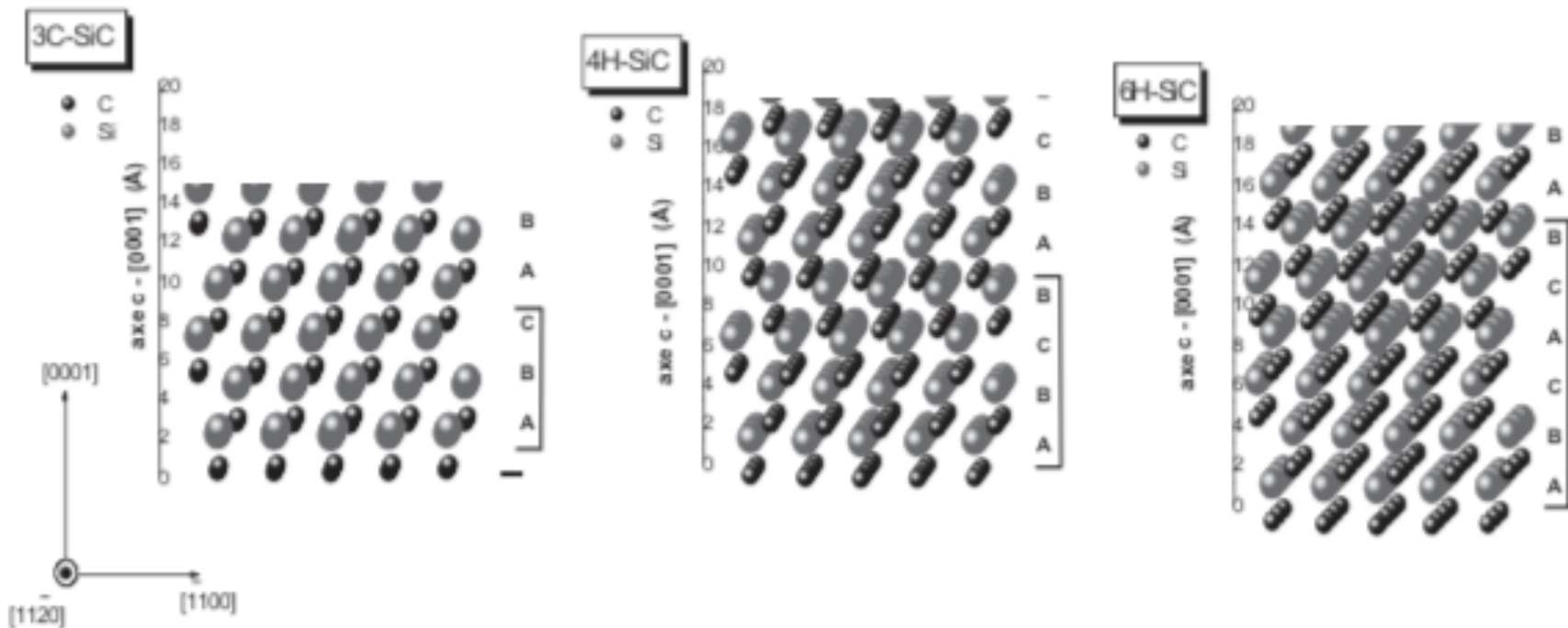
A la fecha se han descrito entre 170 y 200 politipos, pero solo unos pocos han sido sintetizados en la forma de materiales estables de un solo tipo.

El politipismo del SiC es una explicación parcial de las dificultades que aún hoy se encuentran en la producción de substratos homogéneos de SiC, especialmente porque cada politipo tiene propiedades físicas que varían de uno a otro.

los politipos considerados para aplicaciones electrónicas son los 3C-SiC, 4H-SiC y 6H-SiC.

Dimensiones de las redes cristalinas de 3C-SiC, 4H-SiC, 6H-SiC y Si.

Politipo	3C	4H	6H
Secuencia	ABC	ABCB	ABCACB
Espaciamiento (Å) Si, a=5,431	a=4,349	a=3,073 c=10,05	a=3,081 c=15,12



Estructura de los politipos 3C-SiC, 4H-SiC y 6H-SiC según notación de Ramsdell.

El politipo empleado en los dispositivos de SiC disponibles en el mercado es el 4H-SiC.

Características químicas, mecánicas y termo-mecánicas.

El enlace entre el átomo de Si y el de C es fuerte, con un nivel de energía de 6,34 eV (por comparación la energía de enlace entre dos átomos de Si es de 4,63eV). Esto hace al SiC un material resistente desde varios puntos de vista y contribuye a su interés tecnológico para diversas aplicaciones incluyendo la electrónica.

Desde que Acheson desarrolló el primer proceso para producir SiC en el siglo 19, su uso principal, basado en su dureza mecánica (alrededor de tres veces la del Si) fue como un abrasivo en los procesos de mecanización de piezas de acero.

La dureza mecánica es un problema en las aplicaciones electrónicas, dado que dificulta los tratamientos mecánicos necesarios (cortado, pulido).

Adicionalmente el enlace es muy resistente a la temperatura, y se rompe solo a 2.830°C , haciendo que, en condiciones razonables de presión, el material se sublime, en vez de fundirse, por lo que no se puede sintetizar desde una fase líquida usando las técnicas convencionales de recristalización.

Crear un cristal único de SiC es más difícil que hacerlo con Si, especialmente porque el arreglo cristalino resultante es sumamente sensible a las condiciones de temperatura y presión.

Los cristales producidos por el proceso Acheson no son de calidad suficiente para aplicaciones electrónicas, pero la calidad de los crecidos con el proceso Lely modificado introducido a finales de los 80s por la compañía Cree Research es aceptable.

En todo caso la fabricación de cristales de SiC de "grado electrónico", si bien es mas compleja que la de sus equivalente de Si, es mucho mas simple que la requerida para producir los dispositivos de GaN.

El SiC tiene una alta resistencia a los agentes químicos, y por lo tanto es muy difícil insertar átomos dopantes en el cristal, para lo que se necesita un aporte de energía mayor que en el Si.

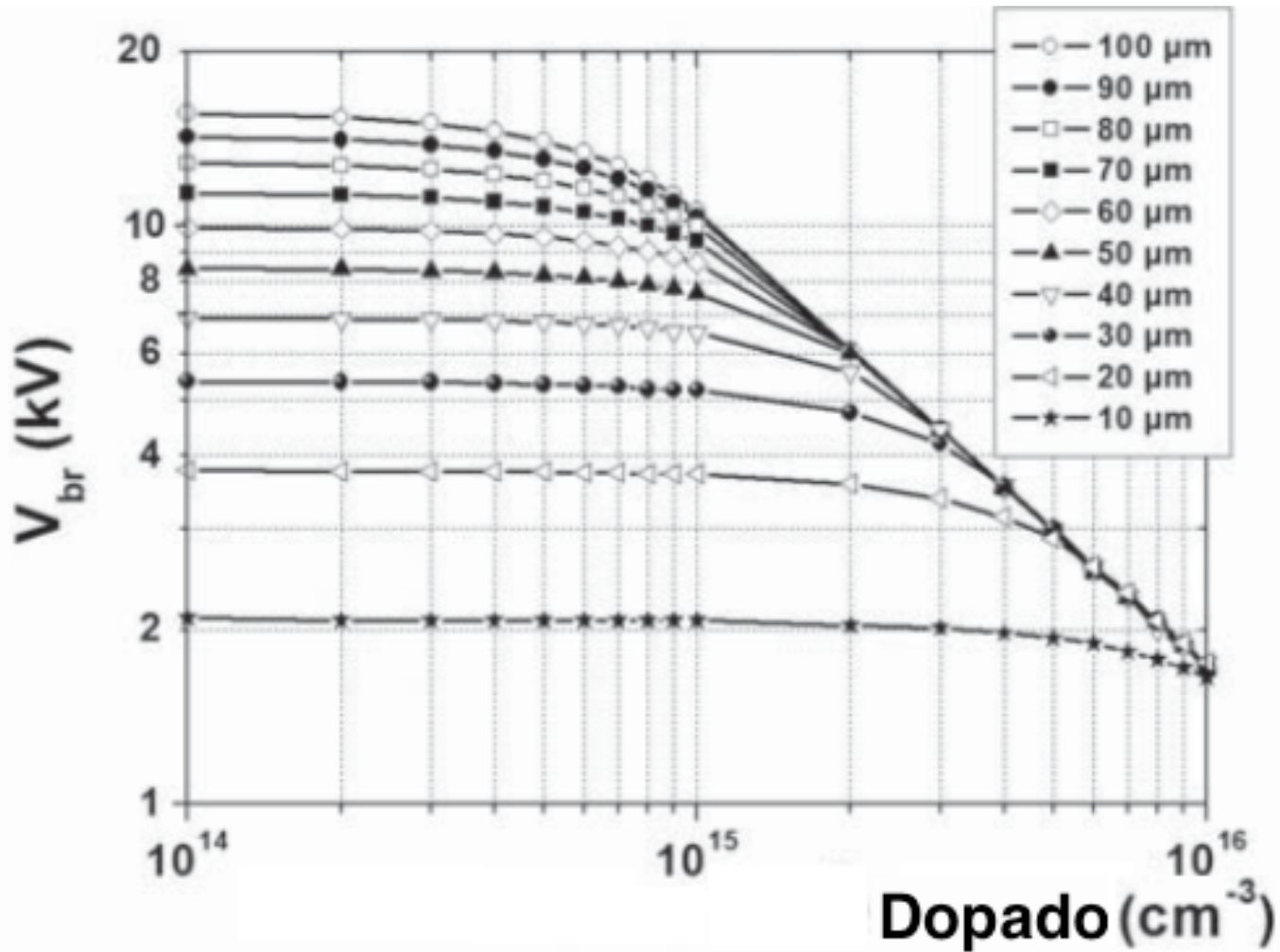
El SiC se suele dopar con aluminio (Al) y nitrógeno (N) para producir las regiones de tipo p y n respectivamente.

Su coeficiente de expansión térmica, $4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$ es aproximadamente dos veces mayor que el del Si; es por lo tanto mas parecido a los del cobre ($17 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$, o el aluminio, $22 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$, que al de la sílice, $5,5 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$.

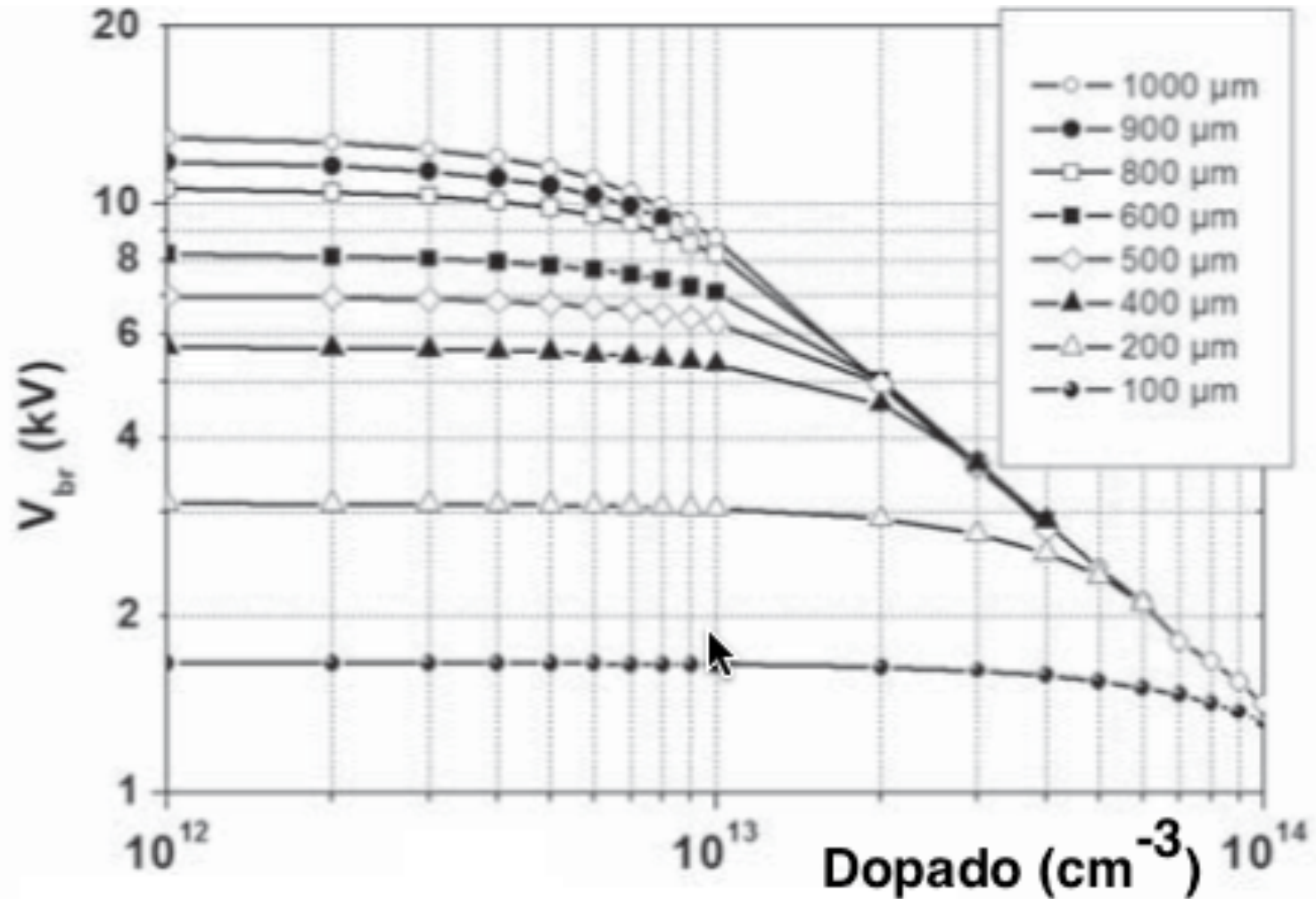
Características electrónicas y electro-térmicas.

1.- Una energía de banda prohibida elevada, dos o tres veces mayor que la del Si dependiendo del politipo. De esto resulta que el campo eléctrico de ruptura es unas 10 veces superior al del Si y una menor concentración de portadores intrínsecos, n_i , de entre 9 y 19 órdenes de magnitud según el politipo.

2.- Estas características básicas permiten incrementar el rango de voltajes de bloqueo de los dispositivos de control de potencia de estado sólido implementados con SiC, incluso a altas temperaturas de juntura. De hecho es posible lograr voltajes de bloqueo por arriba de los 10kV con zonas con un dopado del orden de entre 10^{14} cm^{-3} y 10^{15} cm^{-3} y entre $70\mu\text{m}$ y $80\mu\text{m}$.



Voltaje de ruptura, V_{br} (V) en función del dopado N_D (cm^{-3}) y el espesor W_N (μm) de la zona de bloqueo del SiC.



Voltaje de ruptura, V_{br} (V) en función del dopado N_D (cm^{-3}) y el espesor W_N (μm) de la zona de bloqueo del Si.

El mayor voltaje de ruptura obtenible en el SiC da una ventaja adicional ya que en igualdad de condiciones el espesor del dispositivo resultante es significativamente menor, lo que directamente produce menores pérdidas en conducción.

En diodos tipo Schottky las tensiones de bloqueo máximas posibles en Si son del orden de los 200V, y pueden llegar a unos 3KV con el SiC.

La velocidad de saturación es el doble de la del Si, lo que implica una frecuencia de conmutación significativamente mayor.

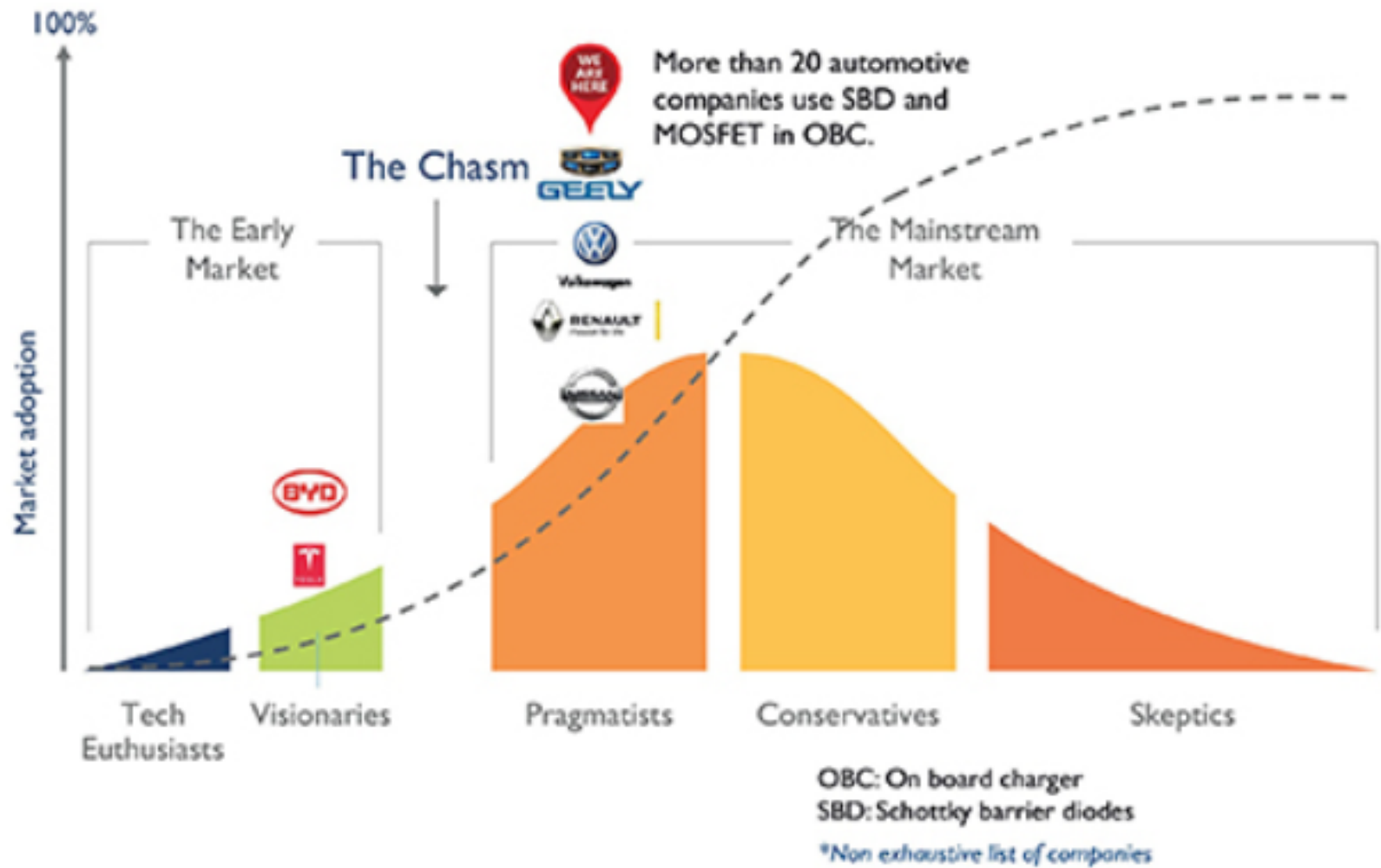
Otra ventaja significativa es que su conductividad térmica es unas tres veces superior a la del Si.

Resumiendo, las ventajas del SiC sobre el Si son las siguientes:

- Mayor voltaje de bloqueo.
- Mayor temperatura de juntura.
- Reducción del tamaño del dispositivo a igualdad de capacidad corriente.
 - Reducción de las pérdidas.
 - Aumento de la frecuencia de conmutación.
 - Aumento de la potencia controlable.
- Mayor densidad de potencia en el sistema, incluyendo una reducción en el tamaño de los componentes pasivos.
- Sistemas mas sencillos, con menor cantidad de dispositivos conectados en serie o en paralelo.

Sin embargo, por lo menos en el futuro inmediato el Si tiene dos ventajas competitivas fundamentales: es una tecnología muy madura que acumula unos 60 años de desarrollo científico/tecnológico (“saber acumulado”), y existe una inversión acumulada de decenas de billones de U.S. \$ en facilidades de fabricación.

Como consecuencia existe una marcada diferencia de precio en los componentes que favorece al Si, y hace que la sustitución inmediata del Si no sea posible, pero a largo plazo mucho “saber acumulado” podría transferirse con relativa facilidad a los nuevos materiales (sobre todo al 4H-SiC) lo que, actuando en conjunto con la tendencia a reemplazar planta industrial obsolescente (para Si) por plantas para las nuevas tecnologías, acelerará el proceso de aumento de los rendimientos de fabricación/caída de precio.



Estado actual y tendencias en la adopción de dispositivos de SiC.

Según esta información, la adopción de componentes SiC esta progresando de acuerdo con la curva estándar de adopción de nuevas tecnologías electrónicas.

Nitruro de Galio, GaN.

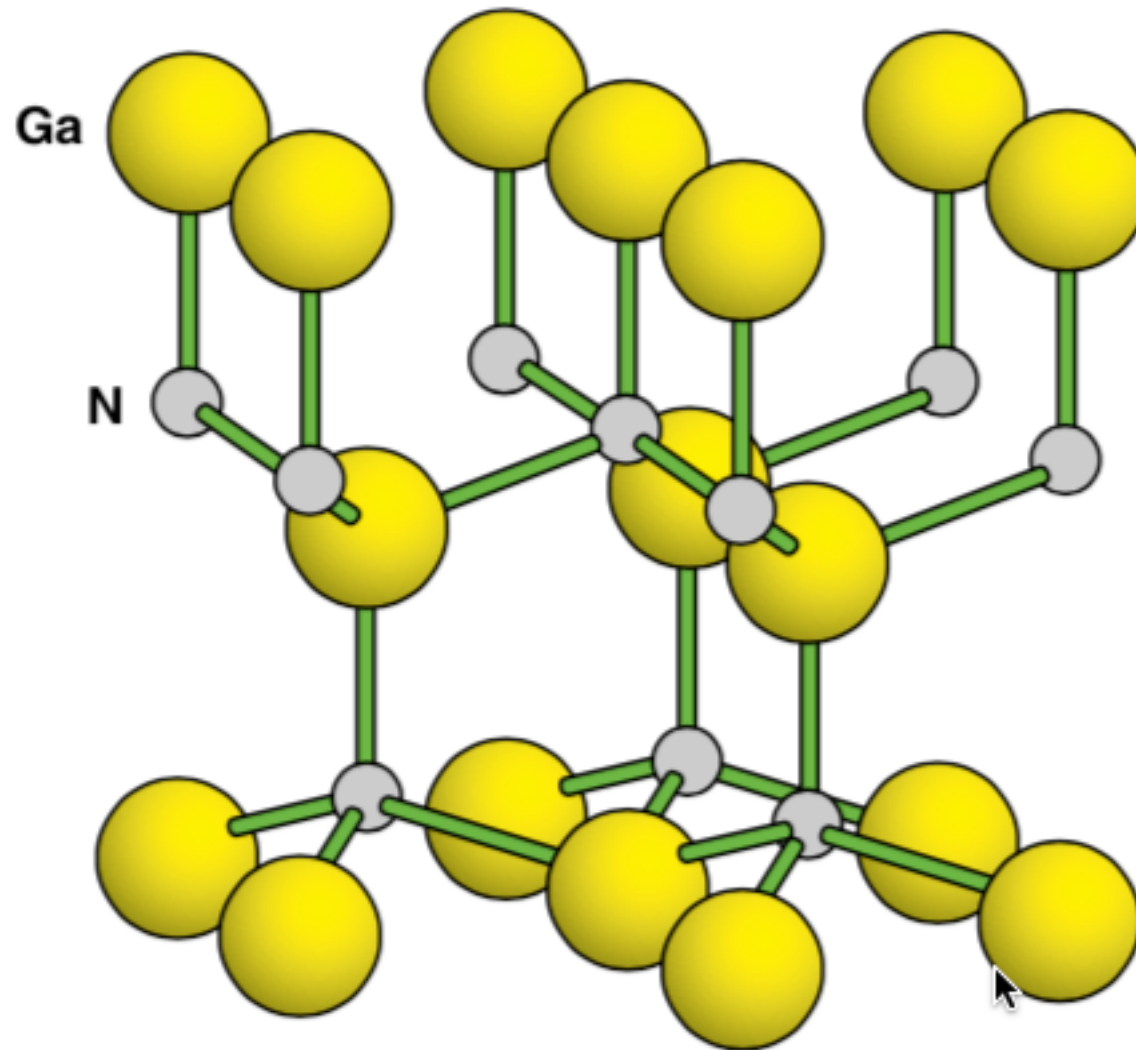
El nitruro de galio es un material artificial que se presentó por primera vez en el mercado en 2004 cuando Eudyna Corporation introdujo transistores de electrones de alta movilidad (HEMT: High Electron Mobility Transistors) tipo JFET de radio frecuencia implementados con este material.

Estos transistores se basan en un fenómeno descrito por T. Mimura en 1975, la formación de una región de muy alta movilidad de los electrones, lo que se llamó un gas electrónico bidimensional en la interfaz de una heteroestructura entre Nitruro de Aluminio-Galio (AlGaN) y Nitruro de Galio (GaN).

El problema básico para producir dispositivos de GaN es que el material funde a los 2.500°C , a una presión de 45.000 atmósferas, lo que hace inviable la fabricación de cristales de forma análoga a los demás materiales, lo que es un problema fundamental en la fabricación de dispositivos, ya que no es posible crecer cristales puros de un espesor suficiente para producir obleas de GaN.

No existiendo sustratos puros de GaN, los dispositivos se deben implementar en capas del material crecidas heteroepitaxialmente sobre sustratos de otros materiales.

El cristal de GaN presenta una estructura básica exagonal, tipo wurtzita. Esta estructura es químicamente muy estable por lo que es mecánicamente robusta y soporta altas temperaturas sin descomponerse. Si se somete esta estructura a tensiones mecánicas se produce un desplazamiento en la misma que genera un campo eléctrico proporcional a la deformación.



Estructura básica tipo wurtzita del cristal de GaN.

El principio operativo de los componentes de GaN es también distinto: no se basa en juntas formadas entre dos capas del mismo semiconductor con diferentes dopados, sino en la interacción entre un cristal de GaN y una capa delgada de AlGaN que se hace crecer sobre el mismo. Esto deforma al cristal, creando un gas electrónico bidimensional (2DEG).



Nube de gas electrónico en la unión AlGaN-GaN.

La estructura 2DEG es altamente conductiva, en parte debido a que está confinada en una capa muy pequeña, lo que incrementa la movilidad de los electrones de unos $1.000\text{cm}^2/\text{V}^*\text{s}$ en el GaN no confinado a unos $1.500\text{-}2.000\text{cm}^2/\text{V}^*\text{s}$ en la región 2DEG.

La alta concentración de electrones con muy alta movilidad es la base de los transistores de alta movilidad electrónica (HEMT: "High Electron Mobility Transistor"), tipo específico de dispositivo que solo se puede fabricar en GaN.

	Al₂O₃ (zafiro) (Hexagonal)	6H-SiC (Hexagonal)	γ-LiAlO₂ (Tetragonal)	ZnO (Hexagonal)
a (Å)	4,758	3,0812	5,1687	3,250
c (Å)	12,991	15,102	6,2679	5,207
Ajuste a	$a_{GaN} \parallel a_{Al_2O_3} / \sqrt{3}$	$a_{GaN} \parallel a_{SiC}$	$a_{GaN} \parallel c_{LiAlO_2} / 2$	$a_{GaN} \parallel a_{ZnO}$
Ajuste c	-	$c_{GaN} \parallel c_{SiC}$	$c_{GaN} \parallel a_{LiAlO_2}$	$c_{GaN} \parallel c_{ZnO}$
Desajuste de red	-49% (-13%)	-3,1%	-0,3% c -1,7% ⊥ c	2,1%
Coeficientes de expansión térmica (K⁻¹)	7,5 x10 ⁻⁶	3,2 x10 ⁻⁶	7,5 x10 ⁻⁶	$\Delta a/a=4,56 \times 10^{-6}$ $\Delta c/c=2,56 \times 10^{-6}$ T=300 K

Características de algunos materiales usados como sustratos para el crecimiento de GaN.

Superado el problema de generación de la capa epitaxial de GaN, el dopado se realiza principalmente con silicio (Si) para las regiones tipo n, y con magnesio (Mg) para las tipo p.

La necesidad de usar Mg como dopante positivo crea problemas adicionales, ya que su energía de activación es muy alta (230 eV), lo que implica que solo una fracción pequeña se ioniza a temperatura ambiente, obligando a usar niveles de dopado muy elevados para alcanzar la conductividad deseada; en todo caso el nivel de dopado no puede superar los 10^{20} átomos dopantes por cm^3 , ya que esto degenera la estructura cristalina; el valor mas usado es 10^{18} átomos dopantes por cm^3 . Por otra parte el hidrógeno pasiva al Mg, lo que requiere un recocinado del cristal para reactivarlo.

Sobre el GaN es posible lograr contactos óhmicos metal-semiconductor y también contactos tipo Schottky con Al, Au (oro), Ni/Au (aleación níquel/oro) y Pt/Au (aleación platino/oro).

La superficie del componente se pasiva con películas de Si_3N_4 (Nitruro de Silicio) o SiO_2 (dióxido de silicio).

Los primeros dispositivos de GaN se construyeron creciendo la capa de GaN sobre sustratos de zafiro, que resultaban excesivamente costosos e incompatibles con las tecnologías de fabricación establecidas para el Si.

Esta desventaja se está superando en base al desarrollo de la tecnología de crecimiento hetero-epitaxial de GaN sobre sustrato de Si (GaN-on-Si) por el proceso de deposición en fase de vapor metal-orgánica (MOCVD), lo que está permitiendo fabricar comercialmente obleas de GaN-on-Si de 200mm de diámetro.

El objetivo final actualmente es lograr el crecimiento de cristales gruesos de GaN puro ; se están investigando dos métodos, el llamado “ammono-térmico”, y el de crecimiento epitaxial en fase de vapor híbrido (HVPE).

En el método “ammono-térmico” el GaN se disuelve en amoníaco supercrítico a presiones de entre 100 y 300MPascales, a temperaturas “moderadas” de 300 a 600°C; este método, que ha demostrado velocidades de crecimiento de espesor del cristal entre 100 y 200 μ metros por día, produciendo cristales de alta calidad, tiene la desventaja de que requiere cámaras de fabricación de metales especiales capaces de resistir las muy altas presiones y la gran capacidad corrosiva del amoníaco supercrítico.

En el método de crecimiento epitaxial en fase de vapor híbrido (HVPE) la temperatura de operación es mucho mas alta, del orden

de 900 a 1100°C; la velocidad de crecimiento es mucho mayor, del orden de 200 μ metros por hora, pero la densidad de defectos es mucho mas elevada, del orden de $10^6/\text{cm}^2$.

Ya se han producido obleas experimentales, pero su costo es muy elevado, del orden de \$2.550 cada oblea de 2" de diámetro, y su calidad es muy variable debido al alto número de defectos de crecimiento.

Otra área de desarrollo que se debe completar es la de dispositivos de GaN de conducción vertical, configuración necesaria para producir componentes capaces de competir en densidad de potencia controlada con los dispositivo de Si y SiC.

COMENTARIO FINAL.

Dado el crecimiento esperado en el mercado de los dispositivos electrónicos de control de potencia, y los siempre crecientes requerimientos de aumentar las capacidades de bloquear tensiones, aumentar la corriente manejada, la frecuencia de conmutación y la temperatura de operación, la presión para desarrollar nuevos dispositivos y nuevos materiales semiconductores para aplicaciones de control de potencia es cada vez mayor, lo que significa que, muy posiblemente, estas notas ya están anticuadas porque varios (¿muchos?) fabricantes ya deben de estar preparando la introducción en el mercado de nuevos dispositivos y en varios (¿muchos?) laboratorios de investigación ya se deben de estar probando nuevos materiales, tales como el diamante, el Óxido de Galio (Ga_2O_3) o compuestos aún mas exóticos.