Nuevos materiales para la fabricación de dispositivos electrónicos

Francisco Javier Balbás García

New materials for the manufacture of electronic devices

RESUMEN

En este artículo se presentan las características, prestaciones y posibles aplicaciones de algunos materiales, bien de última generación (caso del carburo de silicio) o bien en vías de investigación (caso del grafeno) para la fabricación de dispositivos electrónicos. Se trata de unos materiales que abren nuevas posibilidades y vías de desarrollo a los diseñadores industriales.

Recibido: 23 de abril de 2011
Aceptado: 30 de junio de 2012

ABSTRACT

This paper presents the characteristics, benefits and possible applications of some materials, good art (the case of silicon carbide) or in the process of investigation (the case of graphene) for the manufacture of electronic devices. Materials open up new possibilities and developing ways for industrial designers.

Received: April 23, 2011
Accepted: June 30, 2012

Palabras clave
Electrónica, materiales, silicio, grafeno, semiconductores, transistores, telecomunicaciones, dispositivos electrónicos

Keywords
Electronics, materials, silicon, graphene, semiconductor, transistors, telecommunications, electronic devices

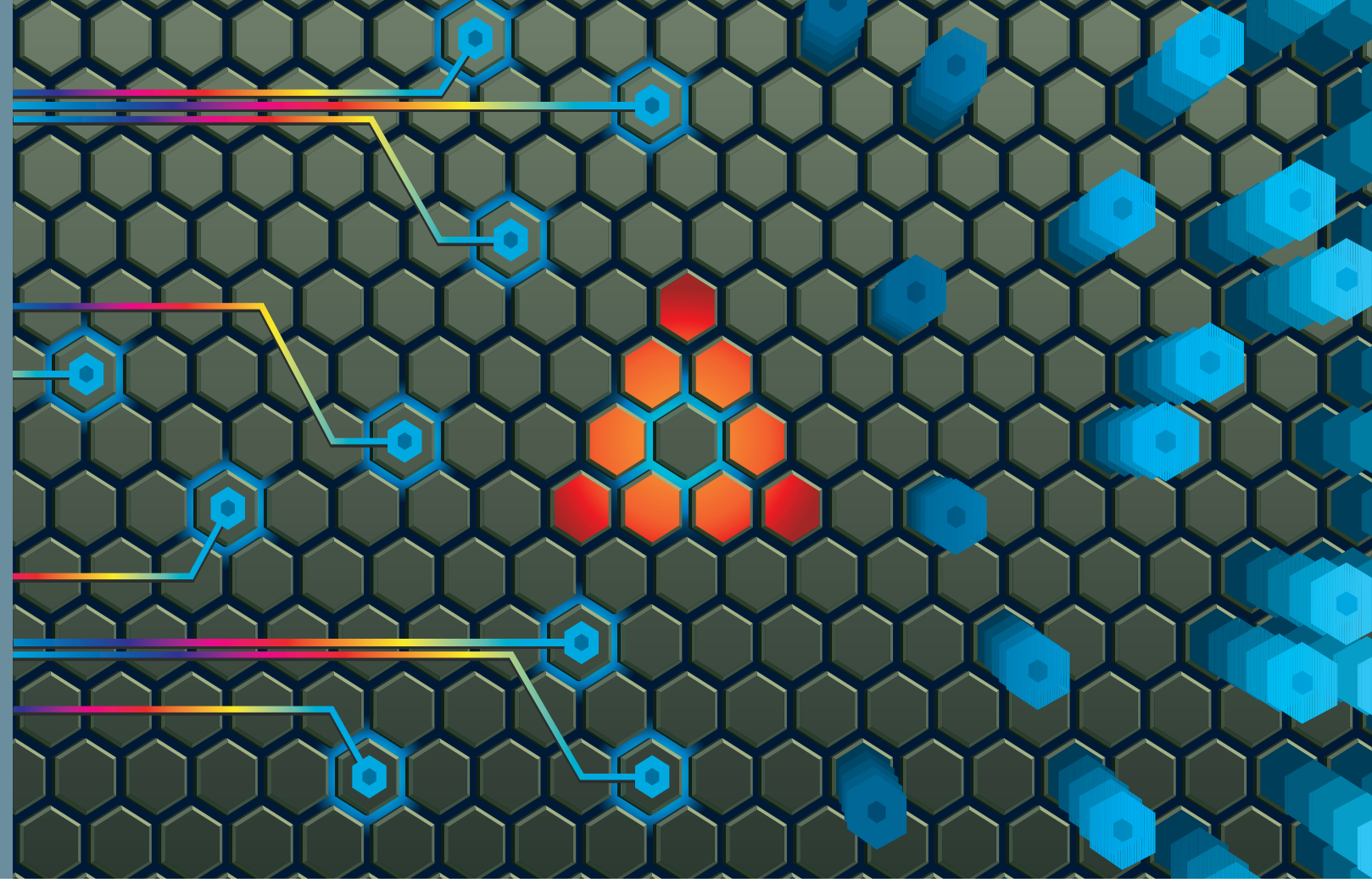


Foto: Shutterstock

La mayoría de los progresos tecnológicos coinciden en el tiempo con el descubrimiento o desarrollo de un nuevo material o dispositivo que aporta nuevas posibilidades implanteables hasta ese momento, facilitando el alcance de nuevas metas y funcionalidades. En la actualidad, el material empleado en la mayor parte de los dispositivos electrónicos es el silicio. El silicio es el componente principal de la mayoría de los dispositivos semiconductores, dado que presenta unas características muy apropiadas, entre las cuales se encuentran:

– La abundancia significativa del material.

– Admite un rango de temperaturas muy aceptable respecto la temperatura ambiente, particularidad determinante frente a la máxima temperatura que admite el germanio.

– Tiene una tecnología de fabricación muy desarrollada que consigue rendimientos superiores al 95% para obleas de hasta 12 pulgadas de diámetro (Semiconductor Solutions, n.d.). Es un factor muy importante en la actualidad, dado que algunos fabricantes de dispositivos semiconductores fabrican simultáneamente varios tipos de dispositivos en cada proceso de fabricación. Además, se produce una mayor cantidad de dispositivos. Debido a esto, las obleas de mayor tamaño ofrecen, mayor versatilidad, un mayor rendimiento del proceso de fabricación y permiten a los fabricantes de semiconductores reducir los costes de producción en un volumen mayor de productos terminados.

Con estas características, el silicio ocupa casi toda la totalidad del mercado. Aun así, esto no quiere decir que con el silicio se consigan unas prestaciones óptimas, pues una vez descritos los beneficios aportados, también aparecen las limitaciones. Este estudio plantea, con algunos ejemplos, la posibilidad de otros materiales que existen en el mercado (es el caso del carburo de silicio) o que están en investigación (como el grafeno) y que amplían enormemente las posibilidades de aplicación y desarrollo de los sistemas eléctricos y electrónicos de potencia. La mayor problemática de estos materiales reside en su proceso de fabricación.

En el caso del carburo de silicio, se ha desarrollado una breve exposición de algunos de los dispositivos existentes en el mercado y sus aportaciones a los circuitos electrónicos. Así mismo, se ha llevado a cabo un estudio práctico para el caso del convertidor Buck-Boost.

Por último y englobando todo lo expuesto anteriormente, en el apartado de conclusiones, se presentan varias premisas y posibilidades para futuros diseños de sistemas y nuevas aplicaciones que pudieran aparecer, utilizando los materiales a los que se ha hecho referencia.

Materiales

Carburo de silicio

El carburo de silicio (SiC) es un material complicado de encontrar en el entorno de forma natural.

Los primeros antecedentes de su existencia datan de finales del siglo XIX, cuando el investigador Henri Moissan se encontraba examinando rocas de un meteorito. Casi al mismo tiempo, en 1893, Edward Goodrich Achenson, mientras trataba carbono con corindón, descubrió la presencia de un material cristalino muy duro de color negro azulado. Se pensó que este material obtenido fuera un compuesto de carbono y corindón, por lo que se denominó *carborundum*'. Actualmente, todo el carburo de silicio utilizado es obtenido mediante síntesis. Y uno de los métodos más simples para su obtención es con una combinación de arena de sílice y carbono en un horno de grafito, denominado de Achenson, a temperaturas entre el intervalo de 1.600-2.500 ºC.

En la actualidad y debido, entre otras muchas razones, a la gran dureza que le

caracteriza, la principal utilización del carburo de silicio es como material abrasivo, pero su aplicación en dispositivos electrónicos se encuentra en avanzado estudio y desarrollo.

Existen alrededor de 250 presentaciones cristalinas similares de carburo de silicio denominadas *polytypes*. Los principales *polytypes* de SiC para su utilización como semiconductor son las estructuras 4H y 6H.

Estos semiconductores están caracterizados por unas propiedades que los hacen muy atractivos para su aplicación en electrónica de potencia. Entre estas propiedades (SiC Power Transistors, n.d.) se encuentran:

– Una elevada conductividad térmica 3,3 (W/cmK) para el SiC-4H y 4,9 (W/cmK) para el SiC-6H.

– Alta densidad de intensidad máxima.

– Significativa resistencia de ruptura ante elevados campos eléctricos.

Propiedades que hacen obvias las ventajas que presenta el carburo de silicio frente al silicio. Con todo, la inmadura y complicada tecnología de fabricación de dispositivos electrónicos en SiC implican que su utilización repercuta en un coste excesivo.

Algunos problemas de los procesos de fabricación del carburo de silicio se encuentran en:

– Los significativos problemas que conlleva la aparición de dislocaciones y *micropipes* que afectarán indeseablemente a la fabricación y que serán tanto más abundantes cuanto mayor sea el tamaño de la oblea (Performance-Limiting Micropipe, 1994). El cristal sufre tensiones internas y externas que causan el crecimiento de los defectos o dislocaciones. *Micropipes* se denominan las dislocaciones lineales extendidas en forma de tornillo, transversalmente a lo largo del cristal.

– Dificultades con la interfaz entre SiC y SiO_2, las cuales han complicado el desarrollo del MOSFET y el aislamiento de la puerta en los transistores bipolares.

– Problemas en los contactos óxido-metal a altas temperaturas.

– Por otro lado, al ser el tamaño de las obleas menor que las utilizadas con el silicio, no se pueden aprovechar totalmente los equipos de fabricación ya existentes. Además, por lo comentado anteriormente, el rendimiento o aprovechamiento de la oblea en su fabricación es muy reducido, del orden del 15% frente al más del 90% obtenido mediante el silicio.

En los últimos años se desarrollan múltiples estudios de investigación y se tiene gran interés sobre la tecnología del SiC. Se han generado múltiples patentes sobre su tecnología de fabricación y se han celebrado congresos y conferencias internacionales.

Aplicaciones del carburo de silicio

En la actualidad, en el mercado se encuentran dispositivos de SiC mediante los cuales se pueden optimizar determinados circuitos o funciones. A continuación, se van a comentar algunos de ellos y sus prestaciones. Posteriormente, se presentará un estudio práctico de aplicación para el convertidor Buck-Boost.

Para la presentación de dispositivos de carburo de silicio se han tomado como referencia las siguientes empresas; en primer lugar, SiCed a Siemens (SiC Power Transistors, n.d.), la cual presenta diodos de barrera Schottky y el dispositivo de conmutación VJFET, y en segundo lugar, la empresa TranSiC (Power Transistors, n.d.), con el transistor BicSiC. Dichos dispositivos se detallan a continuación:

– Diodos Schottky de SiC. Dispositivos que tienen excelentes características de conmutación. Con los diodos de SiC se han obtenido tensiones de bloqueo de hasta 3.300 voltios. Además, se puede trabajar a frecuencias altas, dadas sus particulares características de recuperación. Y, por otro lado, se reducen tanto las pérdidas en el diodo como en la conmutación.

– Una combinación en cascada de un MOSFET de silicio y un VJFET de carburo de silicio proporciona un dispositivo con buenas cualidades de conmutación. Posee las características de entrada del MOSFET de baja tensión y la capacidad de bloqueo la aporta el VJFET utilizado.

– Transistores de carburo de silicio. Según la empresa TranSiC (Power Transistors, n.d.), utilizando transistores de carburo de silicio BitSiC se obtienen las siguientes cualidades:

- Altas temperaturas de trabajo.
- Obtención de alta eficiencia con un tamaño reducido y a alta temperatura.
- Diseño compacto.
- Tolerancia ante la exposición a radiaciones.

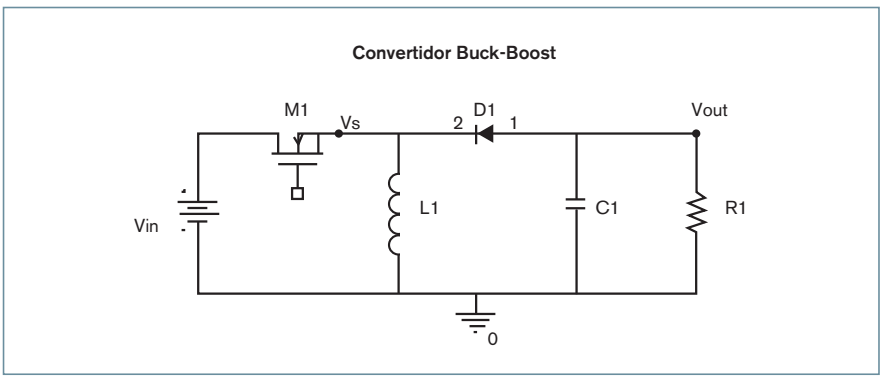
Aplicaciones directas de los dispositivos comentados se obtienen con la simple sustitución de los componentes críticos de un circuito determinado por unos dispositivos adecuados de carburo de silicio con las características apropiadas para la función a desempeñar por el circuito. Como ejemplo, se tiene, el convertidor Buck-Boost, reductor-elevador (sin transformador de acoplamiento, aislamiento). Si se desarrollan los valores de las tensiones a las que se encuentran sometidos los semiconductores, se pueden estimar las posibles contribuciones de los dispositivos de carburo de silicio en las tensiones de trabajo. El convertidor Buck-Boost presentado se analizará en el modo de conducción continuo MCC (en el modo de conducción continuo la intensidad a través de la bobina no se anula durante el funcionamiento).

La señal de salida del convertidor Buck-Boost depende del ciclo de trabajo "D" utilizado. En la figura 2, se presenta la relación existente entre la tensión de entrada del convertidor "V_{in}" y la tensión "V_s" posterior al transistor que actúa como interruptor.

Para desarrollar el análisis del convertidor Buck-Boost, según el ciclo de trabajo utilizado, primero se obtendrán los valores de la tensión de salida "V_{out}" y las tensiones máximas soportadas por el diodo y el transistor, "$V_{D\,max}$ y $V_{T\,max}$", respectivamente.

El cumplimiento, en el convertidor Buck-Boost, del principio de equilibrio de la bobina (voltios-segundo) (Erikson et al, 2001) conduce a la siguiente expresión:

Figura 1. *Esquema del circuito del convertidor Buck-Boost.*



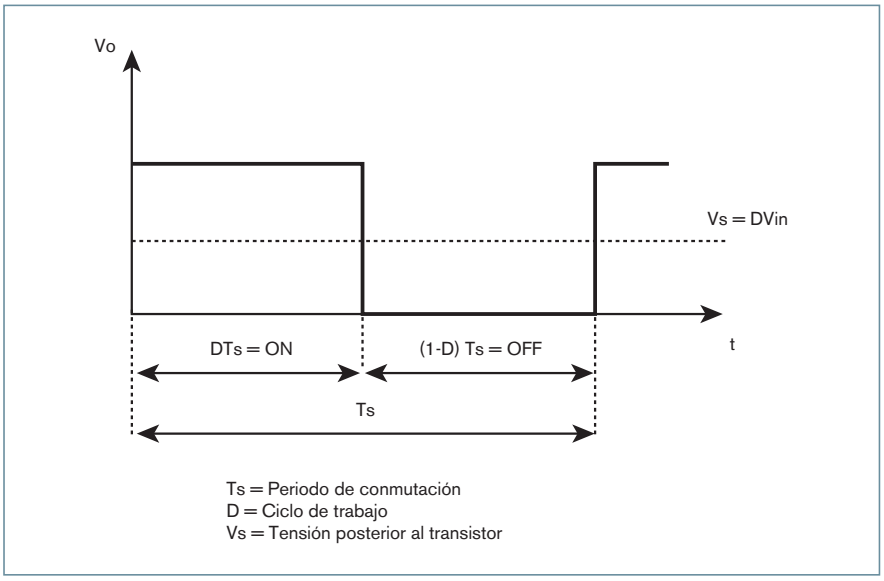


Figura 2. *Relación entre tensiones según el ciclo de trabajo (Erikson, Maksimovic, 2001).*

$$V_{in}\,DT - V_{out}(1-D)T_s = 0$$

De donde se puede obtener el valor de la tensión de salida "V_{out}":

$$V_{out} = V_{in}\,D/(1-D)$$

Los esfuerzos de tensión máximos soportados por los semiconductores, tanto el diodo como el transistor, serán del mismo valor y tendrán la siguiente magnitud:

$$V_{T\,max} = V_{D\,max} = V_{in} + V_{out}$$

Lo cual, substituyendo el valor obtenido de "V_{out}" en la ecuación anterior se tiene:

$$V_{T\,max} = V_{D\,max} = V_{in}/(1-D)$$

Con los datos resultantes se realizará una gráfica según la figura 3, en la que se representan la tensión de salida "V_{out}" y las tensiones soportadas por los semiconductores en función de los distintos valores del ciclo de trabajo, lo cual ayudará a obtener una serie de conclusiones.

Para la obtención de la gráfica, se utilizará el método "en por unidad" referenciando los valores a un valor base de magnitud igual a la tensión de entrada "V_{in}". De esa forma, el eje de ordenadas quedará cuantificado en unidades que expresarán cuantas veces se tiene que multiplicar a "V_{in}" para obtener el valor de los puntos de la gráfica.

Una vez representada la gráfica con valores del ciclo de trabajo desde 0,1 a 0,9, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

– El valor del ciclo de trabajo D = 0,5 será el valor frontera entre el comportamiento como reductor o como elevador.

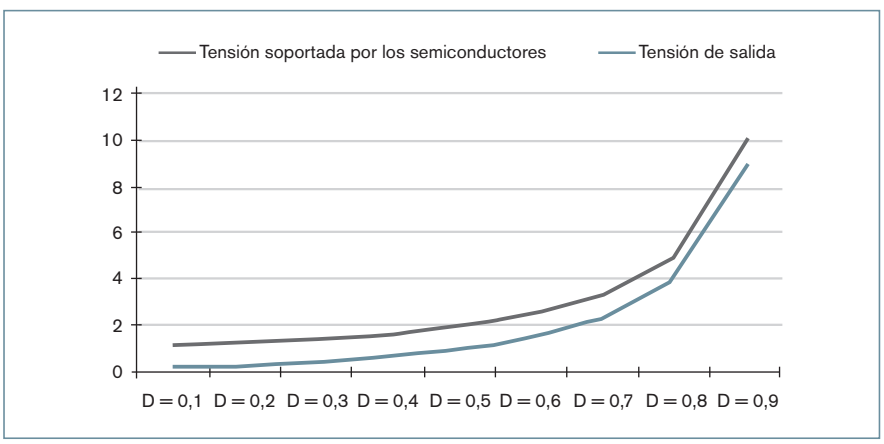
– Siempre habrá un incremento de tensión en el transistor y en el diodo de valor 1, (Valor, en por unidad, igual a la tensión de entrada) respecto la tensión de salida "V_{out}".

– Para valores elevados del ciclo de trabajo (D≥8 el valor de la tensión de salida puede servir casi directamente para evaluar la tensión soportada por los semiconductores dada la poca variación existente entre ellas, del orden del 10%.

– El valor del ciclo de trabajo y la tensión deseada a la salida, servirán como referencia para cuantificar y valorar, si interesa o no, la utilización de semiconductores de carburo de silicio y, así, poder soportar las tensiones apropiadas.

Este es un sencillo análisis que, sin entrar en la posibilidad de otras ventajas como el aumento de la frecuencia de trabajo en el convertidor, la posible reducción del tamaño de los elementos reactivos y la mejora de rendimientos, ya puede dar una primera valoración de la conveniencia y alcance de los dispositivos de carburo de silicio para la aplicación deseada.

Figura 3. *Valores de la tensión de salida y de las tensiones soportadas por los semiconductores según distintos valores del ciclo de trabajo.*



Grafeno

Como material con grandes posibilidades y en investigación y desarrollo se encuentra el grafeno.

El grafeno es una lámina plana de carbono de un átomo de espesor. Su estructura está compuesta por átomos densamente empaquetados en una red cristalina plana de celdas hexagonales, dispuestas en forma de nido de abeja, tal como se muestra en la figura 4.

En algunos materiales los electrones se mueven a lo largo de un plano; de ellos se dice que son bidimensionales. Los materiales más conocidos son las heterouniones de arseniuro de galio (ArGa) utilizadas en teléfonos móviles y en las telecomunicaciones ópticas.

El grafito está compuesto por muchas láminas de grafeno ordenadas transversalmente, de la forma que se dispone en la figura 4. El tratamiento de este material es la base de la obtención del grafeno y el óxido de grafeno (v. figura 5).

El término grafeno apareció en investigaciones realizadas alrededor de 1987 sobre varios materiales entre los que se trataban los nanotubos de carbono (estructuras tubulares cuyo diámetro es del orden de los nanómetros. Pueden presentarse como semiconductores o superconductores según sean sus características, generalmente geométricas del tipo, diámetro, espesor, número de capas, etcétera).

Un avance muy significativo se produjo en la Universidad de Manchester en

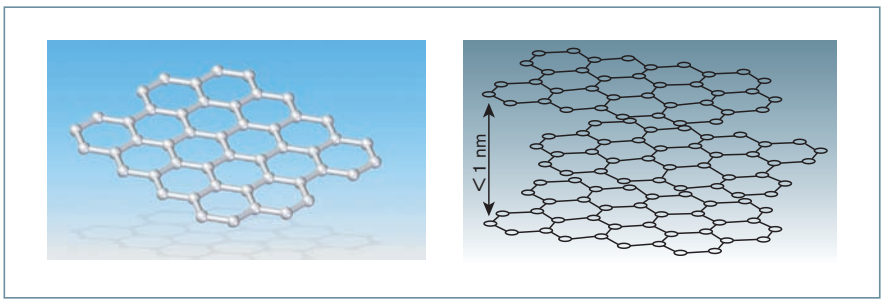


Figura 4. *Estructura del grafeno y su disposición en el grafito.*

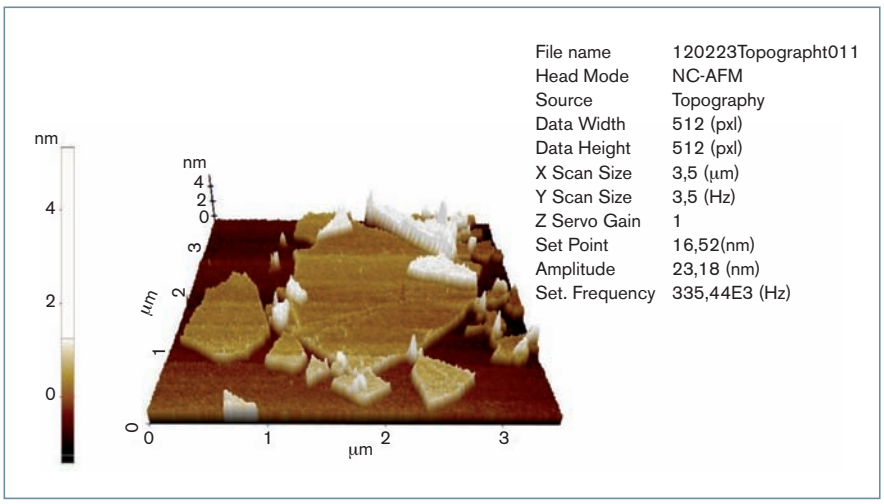


Figura 5. *Imágenes de microscopio de fuerza atómica de óxido de grafeno obtenido a partir de la oxidación de grafito. Cortesía del Area de Materiales Avanzados de la Fundación del Centro Tecnológico de Componentes, Parque Tecnológico de Cantabria.*

2004, cuando el investigador Andre Geim logra extraer cristales de grafeno de grafito a granel (Discovery of graphene, 2004) y trasladarlos a una oblea de silicio en un proceso denominado ruptura micromecánica o técnica de la cinta de Scotch. Esta técnica permitió la primera observación sobre el anómalo *efecto Hall* del grafeno y sus notables propiedades electrónicas (Geim y Novoselov, 2007).

Al mismo tiempo, en el Georgia Institute of Technology se proponía la aplicación del grafeno como material utilizado en microelectrónica, utilizando las mismas técnicas de fabricación conocidas, basadas en crecimiento epitaxial sobre substrato monocristalino (se define como monocristal la estructura cristalina con orientación única y definida, orientación determinante en el proceso de fabricación) (Epitaxial Graphene Lab, n.d.).

A partir de entonces, se han desarrollado grandes avances, en 2008 el Laboratorio Lincoln del MIT, han fabricado cientos de transistores en un solo chip (Berger, Song, Li T., Li X., Ogbazghi, et al., 2004) y en 2009 se han obtenido transistores de muy alta frecuencia y pequeñísimas dimensiones del orden del nanómetro (Lin, Jenkins, Valdes-García, Small, Farmer, et al., 2009).

En 2010 el premio Nobel de Física fue otorgado a los rusos Andre Geim y Konstantin Novoselov por sus trabajos de investigación en el desarrollo del grafeno.

Los estudios citados anteriormente han logrado presentar unas propiedades electrónicas excepcionales del grafeno. Como peculiaridades características del grafeno (Geim, et al., 2007) se encuentran:

– Alta conductividad térmica y eléctrica.

– Los electrones transportados por grafeno se comportan casi como partículas sin masa, con un comportamiento similar a los fotones de la luz.

– Permite una medida precisa y fiable.

Debido a las propiedades anteriores, los electrones del grafeno pueden moverse a través de toda la lámina estructural y no quedarse aislados en ninguna zona (característica de los sistemas bidimensionales con impurezas), consiguiendo una alta conductividad o movilidad de portadores (Bartoli, 2008).

Nuevamente, al igual que con el carburo de silicio, el gran inconveniente que se encuentra en el grafeno reside en su tecnología de fabricación.

Aplicaciones del grafeno

Mediante el grafeno se están obteniendo resultados muy satisfactorios en las prestaciones y características de los dispositivos electrónicos.

IBM (Lin et al., 2009) ha logrado dispositivos con características excepcionales:

Reducción significativa del tamaño, longitudes de puerta de 150 nm, dimensiones propias de la nanotecnología.

Elevadas frecuencias de conmutación, en las que la alta movilidad de los electrones hacen al grafeno un firme candidato para los osciladores de ultra alta frecuencia y los conmutadores.

IBM ha desarrollado estos dispositivos utilizando como sustrato monocristalino una oblea de silicio. Pero pretende mejorar sus resultados llegando a frecuencias del orden de 100 GHz cuando la tecnología de fabricación sobre obleas de carburo de silicio esté más desarrollada.

Conclusiones

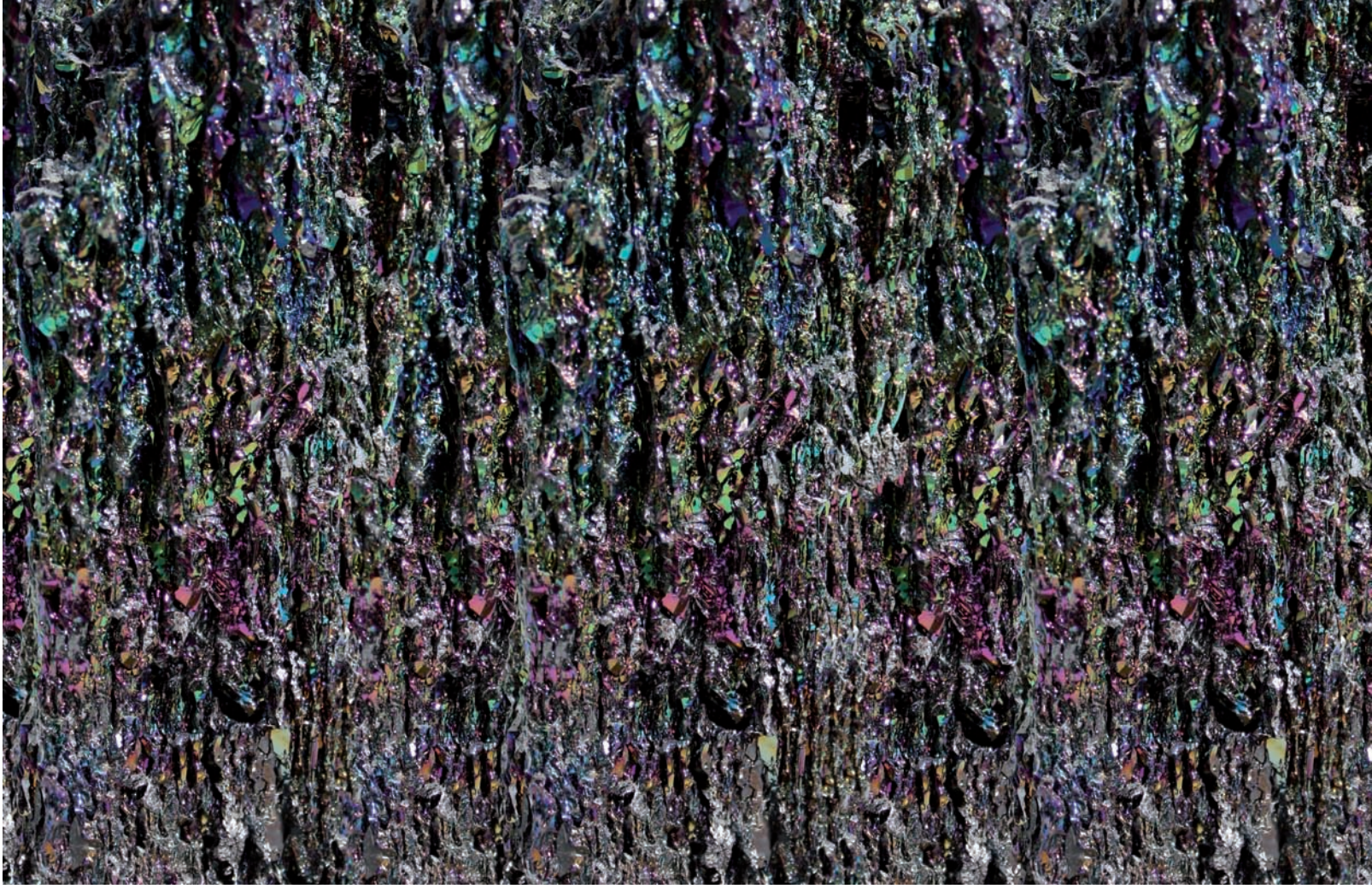
A lo largo de esta exposición se han presentado dos materiales que están recién implantados o en fase de investigación, para aplicaciones en la electrónica de potencia, dejando constancia tanto de sus buenas propiedades, características y posibilidades, como de sus limitaciones en la actualidad.

En primer lugar, los dispositivos existentes, presentes en el mercado de carburo de silicio, ya deben ocupar un lugar en las mentes de los diseñadores de sistemas eléctricos y electrónicos de potencia, realizando un estudio de necesidades y un resultado de coste-beneficios en la utilización total o parcial de dispositivos de SiC y de sus ventajas. Se pueden plantear, como posibles estudios de diseño, los siguientes proyectos:

– Transmisión de energía eléctrica en tensión continua, tanto en líneas soterradas como submarinas y llegado el caso en líneas aéreas, con longitudes más reducidas en todas ellas. Ejemplos interesantes:

- La generación de energía eólica *offshore* (mar adentro), como es el caso de la *Offshore-grid* en los mares del Norte y Báltico para 2030.
- Conexiones eléctricas insulares, como la conexión realizada entre la península Ibérica y las islas Baleares.
- Líneas soterradas para reducir el impacto medioambiental paisajístico y visual, como ocurre en la conexión hispano-francesa, a través de los Pirineos.

– Reducir o llegar a anular la necesidad de otros componentes, como podrían ser los elementos de refrigeración en el caso de la utilización de elementos de



Carburo de silicio. Foto: Jasminka Keres / Shutterstock

SiC, mediante los cuales la temperatura ya no es tan problemática.

– Reducir dimensiones de la electrónica de potencia para, por ejemplo, su aplicación en vehículos eléctricos.

En segundo lugar, desde la perspectiva del investigador, no se deben olvidar y es importante tener presentes, todas las prestaciones de los nuevos dispositivos (como las del grafeno) para la apertura de nuevas líneas de investigación. Ejemplos se encuentran en:

– Las elevadas frecuencias de conmutación que facilitarán una significativa mejora de la calidad del muestreo de las señales.

– Un reducido tamaño que facilitará la entrada en una nueva percepción del dimensionamiento y todas las posibilidades que ello acompaña (miniaturización de los sensores y actuadores, nanotecnología).

En la actualidad, es posible que con la aparición de nuevos hábitos en el entorno medioambiental, social y económico, como pueden ser el transporte eléctrico y la generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables o el consumo eficiente de la energía por parte de los consumidores, se faculte el impulso necesario para conseguir la amplitud y diversidad en la utilización de los dispositivos fabricados con estos nuevos materiales y así, poder disfrutar de las ventajas por ellos ofrecidas.

Bibliografía

Bartoli C (2008). *Graphene on silicon carbide*. Institut Néel. Disponible en: http://neel.cnrs.fr (Consultado el 25 de octubre de 2010).

Berger C, Song Z, Li T, Li X, Ogbazghi A, Feng R, et al (2004). School of Physics, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia. Ultrathin Epitaxial Graphite: 2D Electron Gas Properties and a Route toward Graphene-based Nanoelectronics. American Chemical Society.

Discovery of graphene (2004). American Physical Society. Disponible en: http://www.aps.org (Consultado el 15 de julio de 2010).

Epitaxial Graphene Lab (n.d.). Georgia Tech, MRSEC Materials Research Science and Engineering Center. Disponible en: http://www.graphene.gatech.edu (Consultado el 30 de agosto de 2010).

Erickson R. W., Maksimovic D. (2001). *Fundamentals of Power Electronics*. Kluwer Academic Publishers Group, ISBN: 0-7923-7270-0.

Geim AK, Novoselov KS (2007). The rise of graphene. Manchester Centre for Mesoscience and Nanotechnology, University of Manchester. Natura Publishing Group.

Lin Y, Jenkins KA, Valdés-García A, Small JP, Farmer DB, Avouris P (2009).

Operation of Graphene Transistors at Gigahertz Frequencies, IBM TJ. Watson Research Center. American Chemical Society.

Performance-Limiting Micropipe Defects Identified in SiC Wafers (1994). National Aeronautics and Space Administration. R&T Review Articles.

Power Transistors in Silicon Carbide (n.d.). TranSiC. Disponible en http://www.transic.com (Consultado el 27 de julio de 2010).

Semiconductor solutions (n.d.). MEMC electronics materials, Inc. Disponible en http://www.memc.com (Consultado el 10 de agosto de 2010).

SiC Power Transistors (n.d.). SiCED Electronics Development GmbH & Co. KG. Disponible en http://www.siced.com (Consultado el 21 de julio de 2010).

Francisco Javier Balbás García

balbasfj@unican.es

Ingeniero técnico industrial, especialidad de electricidad (electrónica industrial). Máster Oficial en Investigación en Ingeniería Industrial (módulo electro-energético). Profesor asociado del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación de la Universidad de Cantabria. Profesor del Máster en Tecnología de Instalaciones de la Edificación GTED-UC de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria. Técnico del Laboratorio de Ensayos No Destructivos aplicados al sector de la construcción (LABEND-UC). Investigador del Grupo I+D de Gestión y Tecnología de la Edificación de la Universidad de Cantabria (GTED-UC) en el sector de la eficiencia energética.Gerente en la empresa Anjaca (Ingeniería Industrial y de Laboratorio).