

---

El progreso impuesto en el hardware por la ley de Moore, desde que fue enunciada en 1965 por Gordon Moore, está llegando al límite posible de la dimensión física de su componente fundamental, el transistor CMOS. Se describen doce líneas para continuar con el progreso en el hardware que ha impuesto esta ley(1). De las doce líneas se considera a la computación cuántica la línea más prometedora ya que, a diferencia de la computación clásica, no se necesita que se doble el número de componentes en un chip para asegurar el cumplimiento de la ley de Moore y de esta forma, como consecuencia directa, que los precios del hardware bajen al mismo tiempo que sus prestaciones, p.ej., la capacidad de cómputo y la eficiencia energética, entre otras, suban. Mediante la computación cuántica, el futuro cumplimiento de la ley de Moore, exigiría solamente ir añadiendo un componente adicional en un chip, implementado en forma de qubit, gracias a dos propiedades de la física cuántica, denominadas superposición y entrelazamiento. Además, es necesario señalar que añadiendo más qubits, la computación cuántica haría palidecer a la ley de Moore(2).

## DOCE LÍNEAS DISRUPTIVAS EN *HARDWARE* PARA EXTENDER LA LEY DE MOORE

La ley de Moore, que establecía que la cantidad de componentes que se pueden agrupar en un chip se duplicaba cada dos años, y posteriormente cada dieciocho meses, ha permitido el desarrollo de la industria informática durante más de cincuenta años. En efecto, la industria tecnológica se ha basado en la idea de mejorar continuamente el *hardware*. Esto, ha permitido que el mercado de la electrónica de consumo, basado fundamentalmente en el silicio, material barato y abundante, se haya beneficiado de dispositivos cada vez más pequeños y veloces, con mayor capacidad de cálculo y de almacenamiento, a la par que más baratos y con mayores prestaciones.

Pero después de más de cincuenta años, la ley de Moore, se encuentra en riesgo y podría ser una cosa del pasado, durante la próxima década. Las propiedades que hacen que el silicio sea atractivo para la fabricación de microchips se podrían acabar una vez que se lleva a los transistores hasta el nivel nanométrico inferior a los 5 nm, lo que significa el final de la miniaturización o la necesidad de pasar a nuevos materiales. Además, es necesario tener en cuenta dos consideraciones adicionales: aunque es cierto que a medida que los chips se iban reduciendo de tamaño funcionaban más rápido y permitían aumentar las prestaciones de los computadores a la vez que disminuía su consumo energético, este efecto, denominado escalamiento de Dennard(3), se rompió a mediados de los años 2000 y, por otra parte, el coste de una nueva fábrica más moderna de chips basados en silicio, se duplica cada cuatro años: es lo que los fabricantes de chips, denominan, en broma, la segunda Ley de Moore(4). En este sentido Robert Coldwell, jefe de arquitectura de Intel, indicaba en 2013 que la ley de Moore estaría muerta y enterrada en 2020, o a más tardar en 2022 y que

el proceso de fabricación alcanzaría a lo sumo los 7 nm o quizás los 5 nm. En su opinión, el final de la ley de Moore no sería culpa de la física, sino más bien de la economía. Otros analistas, señalan 2023 como el año en el que se producirá la singularidad. Lo cierto, sin embargo, es que la Universidad de Berkeley, anunció en el año 2016 el transistor de 1 nm, pero utilizando nanotubos de carbono y un material llamado disulfuro de molibdeno sobre la capa de silicio convencional. Actualmente, este transistor se trata solo de una demostración científica a nivel de prueba de concepto(5). La revista Science, apuntaba sin embargo, que los transistores llegarían a solo 2 nanómetros, o aproximadamente a unos 10 átomos de diámetro, dado que el diámetro del átomo de silicio asciende a 0,24 nanómetros, o sea, su radio medio son 120 picómetros(6).

Por otra parte, el límite impuesto por el escalamiento de Dennard ha hecho que la frecuencia máxima de los circuitos integrados basados en silicio se haya situado alrededor de los 5 GHz y que este valor no se haya superado desde el año 2005(7). Sin embargo, la tecnología avanzada de semiconductores desempeña un papel importante en la evolución de las aplicaciones de radiofrecuencia y microondas para 5G y comunicaciones por satélite, donde la próxima generación de sistemas se está moviendo hacia frecuencias que implican longitudes de onda milimétricas(8). En efecto, con los 5 GHz de los chips de silicio se llegaría únicamente a longitudes de ondas centimétricas ya que las frecuencias de ondas milimétricas abarcan desde los 30 a los 300 GHz ofreciendo propiedades de propagación muy interesantes ya que existe un enorme ancho de banda disponible en este rango de frecuencias para comunicaciones inalámbricas de alta velocidad(9).

Actualmente, para 5G, se contemplan las bandas de 3,6 GHz, la banda de 26 GHz y la banda de 700 MHz, para dos de las cuales, si serían, válidos los chips de silicio, tanto para el caso de la banda de 700 MHz como para el caso de la banda de 3,6 GHz. Sin embargo, para poder ofrecerse las conexiones previstas en 5G, con velocidades teóricas de hasta 10 Gbps, sería necesaria la banda de 26 GHz, conforme al teorema de Shannon, que establece la velocidad teórica máxima de transferencia de información de un canal para un nivel de ruido determinado. De hecho, la banda de 700 MHz garantizaría una velocidad mínima de 100 Mbps y la banda de 3,6 GHz podría teóricamente llegar hasta alrededor de los 3 Gbps, habiéndose realizado ya las primeras pruebas comerciales en España y habiéndose obtenido hasta 1 Gbps en descarga de datos(10). Diferentes dispositivos 5G, se fabrican en Nitruro de Galio (GaN) o Arseniuro de Galio (GaAs) ya que los semiconductores de GaN y GaAs tienen más ventajas que los tradicionales basados en Silicio: mayor velocidad de conmutación, menores pérdidas de corriente eléctrica y mayor densidad de potencia. La mayor velocidad de conmutación es la que permitiría precisamente trabajar en la banda de 30-300 GHz.

Pero los límites que impone la tecnología de silicio y que obligan a la búsqueda de nuevos materiales y tecnologías, no se encuentran únicamente en el ámbito de las comunicaciones 5G. Adicionalmente, se puede citar, p.ej., el caso de la electrónica de potencia. Como alternativa más firme al silicio, se encuentran los materiales semiconductores de banda ancha, y muy en particular el carburo de silicio (SiC), que ya ha empezado a tener una cierta presencia en el mercado a través de los diodos de SiC. En electrónica de potencia, cuanto mayor es la frecuencia de conmutación del dispositivo, mayores son las pérdidas. En este sentido, las propiedades del SiC permitirán trabajar con frecuencias más elevadas por las menores pérdidas que ocurren en la conmutación de los dispositivos de SiC(11).

En resumen, es necesario, por tanto, encontrar nuevas tecnologías y materiales alternativos que aseguren el progreso del *hardware* más allá de la singularidad que se producirá en la ley de Moore a medida que la miniaturización se vaya aproximando todavía más a las dimensiones del átomo de silicio. Al fin y al cabo, el problema del silicio es un problema térmico ya que al aumentar la densidad de transistores aumenta el calor generado para un mismo volumen y, por lo tanto, no es posible extraer el calor suficientemente rápido sin riesgo de sobrecalentar y dañar al microprocesador. Además, se producen efectos de túnel cuántico debido al cual una parte de la corriente eléctrica puede saltar de un circuito a otro a través de un aislante(12). Los computadores cuánticos, por el contrario, como es imposible evitar los efectos cuánticos, tratan de sacar partido de ellos.

El final de la ley de Moore, todavía no se ha escrito, y su final probablemente, como se mencionaba anteriormente, no estará relacionado solamente con

la física sino con la economía, en concreto con el coste de fabricación en masa. Todas las evidencias muestran por tanto que es necesario buscar líneas alternativas para continuar con el progreso en el *hardware*, sin conformarse con la capacidad de cómputo máximo que se obtendría al llegar a la finalización de la ley de Moore. Téngase en cuenta que la capacidad de computación es proporcional al número de transistores por mm<sup>2</sup> y al llegarse al límite, no se obtendría capacidad de cómputo adicional por chip de silicio, habiendo que conformarse con la máxima obtenida. Se exponen a continuación doce líneas de trabajo, ya sean tecnologías o materiales, que podrían contribuir a extender el progreso en el *hardware* que se ha obtenido gracias al silicio y a la ley de Moore, para, a continuación, hacer una especial referencia a la computación cuántica, una de las líneas más prometedoras y objetivo principal de este trabajo. Una infografía animada de la evolución de la ley de Moore desde 1971 hasta 2019 puede verse en este excelente vídeo[1]: en el que se refleja la predicción del número de transistores en un chip que establece la ley de Moore frente al número efectivo de transistores en los diferentes chips comerciales.

## DOCE LÍNEAS DISRUPTIVAS EN *HARDWARE* PARA EXTENDER LA LEY DE MOORE

Si bien es cierto que el fin de la ley de Moore, esto es, el momento concreto en el que se producirá la singularidad, todavía no se conoce con certeza, no es menos cierto que es necesario buscar alternativas que aseguren un progreso sostenido en el *hardware*. En el artículo de IDG(13) "12 technologies that can extend Moore's Law" se señalan doce posibles tecnologías o materiales, si bien no se concreta por qué y cómo estas tecnologías o materiales conseguirían extender la ley de Moore. Aunque se intentarán realizar algunas consideraciones en este sentido para cada una de las doce tecnologías o materiales, en el caso concreto de la computación cuántica, este aspecto, resulta claro, ya que un único componente cuántico adicional, implementado en forma de *qubit* consigue doblar la capacidad de cómputo de un chip cuántico extendiendo de esta forma la ley de Moore. Adicionalmente, es necesario señalar que la ley de Neven, todavía por confirmar, predice un crecimiento doblemente exponencial en el número de componentes que se podrán implementar como *qubits* en un chip cuántico, con lo que la capacidad de cálculo de los computadores cuánticos permitiría resolver en segundos problemas actualmente irresolubles o cuyo tiempo de resolución podría llevar años o incluso siglos, haciéndolos irresolubles de facto. Es por este motivo, por lo que el presente trabajo se centra en la computación cuántica, considerando que de las doce líneas disruptivas que se exponen a continuación, es sin duda, la más prometedora. Téngase en cuenta que la ley de Moore, más que una ley propiamente dicha, es una profecía autocumplida, en el sentido de que la industria se ha esforzado con éxito para hacer efectivo su cumplimiento(14).

El cumplimiento de la ley de Moore exigiría que se pudiese seguir doblando el número de transistores que se pueden integrar en una determinada superficie. Se considera entonces  $1 \text{ mm}^2$ , si actualmente se integran  $x$  transistores, transcurridos dos años, se deberían poder integrar en esa misma superficie  $2x$  transistores. O sea, doblarse, el número de transistores cada dos años. Como se está hablando del final de la ley de Moore, ello significa que, con Silicio, el material que ha permitido el cumplimiento de la ley de Moore, habrá un momento en el que no se podrá conseguir esa densidad de integración. Lo que hay que analizar, por tanto, es si estas doce líneas de progreso en el *hardware* podrían seguir consiguiendo esta densidad de integración de transistores por  $\text{mm}^2$  que ha venido obteniéndose a través de la ley de Moore basada en el silicio. Para doblar el número de estados en un chip clásico hay que doblar el número de transistores, porque cada transistor en un instante dado solo puede estar en un estado ya sea "1" o "0", "encendido" o "apagado", "on" o "off", es decir cada transistor representa un bit o dígito binario, y en un instante dado podría estar encendido o apagado, en estado "1" o en estado "0" pero no en ambos estados a la vez.

En el caso de la computación cuántica, el hecho de que un componente cuántico, implementado en forma de *qubit* o *quantum bit*, en un instante dado, pueda encontrarse en una superposición de estados, asegura ya de entrada, añadiendo un único *qubit*, el cumplimiento de la ley de Moore, ya que un *qubit* adicional dobla el número de estados posibles del chip sin necesidad de tener que doblar el número de transistores. Esto puede entenderse con facilidad si consideramos p.ej. tres bits implementados por tres transistores. En un instante dado, estos tres transistores se encontrarán solamente en uno de estos 8 estados posibles:

000,001,010,011,100,101,110,111

La diferencia es que esos 8 estados posibles, se tienen de forma simultánea debido al principio de superposición de la física cuántica con tres *qubits*. Es decir, con tres *qubits* se tienen en un instante dado los 8 estados posibles, mientras que, con tres transistores, en un instante dado, solo se tiene uno de esos 8 estados posibles. Para disponer simultáneamente de los 8 estados posibles con computación clásica, necesito  $8 \cdot 3 = 24$  transistores, cada uno de los cuales implementa un bit, es decir, un "1" o un "0". Para disponer de los 8 estados posibles en computación cuántica, solo necesito 3 *qubits*, ya que cada uno de estos *qubits* se encuentra simultáneamente y debido a la superposición, en una combinación de "1" y "0" simultáneamente. Con tres *qubits* se dispone de  $2^3$  estados simultáneamente.

Imagínese que se quisiese doblar el número de estados a 16 estados:

0000,0001,0010,0011,0100,0101,0110,0111,1000,1001,1010,1011,1100,1101,1110,1111

Se necesitarían  $16 \cdot 4 = 64$  transistores, pero solo se necesitaría un componente cuántico adicional implementado en forma de *qubit*, porque con 4 *qubits*, se pueden representar  $2^4 = 16$  estados. En computación clásica, ir añadiendo potencia al hardware, implica doblar el número de estados, lo que a su vez implica multiplicar por dos el número de transistores, mientras que, en computación cuántica, doblar el número de estados implica únicamente un *qubit* adicional.

Considerando en principio a la computación cuántica la línea más prometedora para extender la ley de Moore, se pasa a exponer las doce tecnologías que pueden ser candidatas a extender la Ley de Moore(15), incluida la propia computación cuántica:

### Litografía Ultravioleta Extrema (EUV)

Las técnicas de litografía llegaron ya a su límite. La litografía de ultravioleta extrema (EUV) utiliza ondas de luz más pequeñas y puede crear chips de mayor densidad. Mediante esta técnica, la fabricación de chips se logra mediante el uso de la luz para proyectar patrones de circuitos en las obleas. En los chips de 10 nm y 14 nm, la luz tiene una longitud de onda de 193 nm, mientras que para los chips de 7 nm se usa una luz con una longitud de onda de sólo 13,5 nm. Esta técnica, permite aumentar significativamente la densidad de transistores al tiempo que optimiza el consumo de energía, además de reducir la cantidad de capas que se requieren para cada chip y así reducir los ciclos de producción. El proceso EUV aún es muy costoso debido a las máquinas que se requieren para la fabricación de los micros, por lo que las compañías se han enfrentado a todo tipo de retos que han hecho que esta tecnología se haya demorado en llegar. Este nuevo proceso permite usar una sola capa para transferir el diseño de un chip a la oblea de silicio, mientras que en la tecnología ArF o inmersión de fluoruro de argón que durante años fue el método tradicional, se requieren cuatro capas. En definitiva, las técnicas de litografía de ultravioleta extrema consiguen mediante ondas de longitud de onda más corta abordar la fabricación de transistores de 7 nm y 5 nm. Llegados a este punto, la pregunta que debería hacerse es si la litografía de ultravioleta extrema permitirá producir chips por debajo de los 5 nm, puesto que en caso contrario esta tecnología sólo conseguiría extender la ley de Moore hasta los transistores de 7 y 5 nm.

### Tubos de Vacío Microscópicos

En esta línea, el futuro de los computadores y del *hardware* estaría en su pasado. Las antiguas válvulas electrónicas o válvulas de vacío, constituidas por ampollas de vidrio, similares a las lámparas de incandescencia tenían como problemas principales su tamaño, su excesivo calentamiento y al igual que las lámparas de incandescencia, se fundían con facilidad por lo que para la construcción de computadores fueron sustituidas por el transistor y otros

componentes de estado sólido más pequeños, baratos y fiables que las válvulas. Sin embargo, los tubos de vacío en que investigan los investigadores del Caltech, no se parecen en nada a los objetos voluminosos que zumbaban en la vieja radio familiar y en esas primeras computadoras y estos investigadores están pensando en traer de vuelta esta tecnología obsoleta hace mucho tiempo. El Grupo de Nanofabricación de Caltech está desarrollando tubos microscópicos para evitar los comportamientos impredecibles del silicio una vez que se comienzan a alcanzar dimensiones nanométricas. En este sentido, cabría esperarse un comportamiento predecible de los tubos microscópicos en dimensiones nanométricas, consiguiendo de esta forma extender la ley de Moore.

La NASA también está desarrollando una nueva generación de tubos de vacío que permitirá hacer chips resistentes a la radiación del espacio. Los tubos de vacío pueden ser más rápidos que los transistores y resisten mejor las radiaciones. En la NASA han conseguido desarrollar nanotubos de vacío. El tubo se basa en una cavidad grabada en silicio dopado con fósforo. La cavidad está bordeada por tres electrodos que hacen de fuente, sumidero y puerta. La fuente y el sumidero están separados por 150 nanómetros mientras que la puerta está encima. Los electrones son emitidos por la fuente gracias a un voltaje aplicado entre ella y el sumidero, mientras que su flujo es controlado por la puerta. Este tipo de tubo de vacío es capaz de alcanzar una frecuencia de 0,46 Terahercios, es decir, es unas 10 veces más rápido que los transistores de silicio habituales. Por otro lado, necesita 10 voltios para operar frente al voltio de los transistores.

La ventaja de trabajar a estos tamaños es que no se necesita practicar ningún vacío, pues la probabilidad de que los electrones choquen con átomos del aire a esa escala es muy reducida. El prototipo abre las puertas a la producción en masa a coste reducido. Como está basado en las mismas técnicas fotolitográficas de los chips actuales, tampoco se necesita crear una nueva industria. Aunque se podrán crear circuitos integrados con ellos, lamentablemente los chips obtenidos no serán muy compatibles con los habituales debido a la diferencia de voltaje a la que deberán operar. Pero los nuevos chips de "tubos de vacío" ahorrarán trabajo y costes a la NASA porque serán resistentes a las radiaciones. Además, podrán operar en la gama del espectro electromagnético en torno al Terahercio, entre las ondas de radio y el infrarrojo(16).

Los nanotubos de vacío podrían ser la solución al problema: su fabricación se podría completar con diversos metales y el resultado, dicen sus creadores, podría ser más eficiente energéticamente que los chips de silicio. El doctor Axel Sherer dirige el Grupo de Nanofabricación en Caltech, y allí trabaja con varios colaboradores para desarrollar tubos de vacío diminutos que tienen un tamaño que equivale a una millonésima parte de lo que ocupaban los que se

usaban hace un siglo. El uso de una técnica llamada *quantum tunneling* permite activar y desactivar el flujo de electrones sin que se filtren, algo que les permitiría ser más eficientes y rápidos que los chips basados en transistores. Para el Dr. Sherer los transistores han suplido nuestras demandas en los últimos años, pero "en la próxima década, eso podría no ser cierto"(17).

El transistor de silicio, el pequeño interruptor que es el componente básico de la micro y nanoelectrónica moderna, reemplazó el tubo de vacío en muchos productos de consumo en la década de 1970. Ahora que la reducción de los transistores a más dimensiones liliputienses se está volviendo mucho más desafiante, el tubo de vacío puede estar al borde del regreso. En un laboratorio oscuro aquí, dos pisos debajo del campus del Instituto de Tecnología de California, dos estudiantes miran a través de las paredes de una cámara de vacío de plástico grueso a lo que esperan que sea la próxima cosa pequeña: un chip de computadora hecho de circuitos como tubos de vacío cuyas dimensiones son aproximadamente una milésima parte del tamaño de un glóbulo rojo. El tamaño de un glóbulo rojo típico es de 6-8 nm, por lo que su milésima parte sería un tamaño de unos 6-8 nm. La pregunta pertinente entonces sería la misma que en el caso de la litografía de ultravioleta extrema, ¿se podría extender con los tubos de vacío la ley de Moore, obteniéndose componentes de dimensiones inferiores a los 5 nm? En definitiva, lo que está en juego en el futuro es lo que los ingenieros electrónicos llaman escalamiento, la capacidad de continuar reduciendo el tamaño de los circuitos electrónicos, que se está volviendo más difícil de hacer a medida que se vuelven tan pequeños como los virus. La mayor parte de las bacterias tienen un diámetro aproximado de entre 0,6 y 1  $\mu\text{m}$ , de manera que pueden verse con un microscopio óptico, mientras que los virus, de tamaño notablemente menor, sólo pueden detectarse por microscopía electrónica(18).

La mayoría de los virus poseen un tamaño muy inferior al de las bacterias. Dado su pequeño tamaño es necesario utilizar para su medición una medida inferior a la micra, denominada nanómetro (nm) que equivale a  $10^{-9}$  metros. Su tamaño típico se encuentra entre los 20 y los 250 nm(19). Una cadena de ADN tiene aproximadamente 2.5 nanómetros de diámetro. El Dr. Scherer no cree que el tubo diminuto reemplace inmediatamente al transistor, pero la posibilidad de aplicaciones en el espacio y la aviación ha llamado la atención de Boeing, que está financiando la investigación. Tales chips especiales podrían estar listos comercialmente antes del final de la década. "Hace diez años, los transistores de silicio podían satisfacer todas nuestras demandas", dijo. "En la próxima década, eso ya no será cierto."(20).

## Grafeno

El grafeno es un material compuesto por carbono puro. En el grafeno la longitud de los enlaces car-

bono-carbono es de aproximadamente 142 picómetros. Su radio atómico son 67 pm, de hecho, su composición química es idéntica al diamante o al grafito y la diferencia estriba en la estructura en la que se organizan los átomos de este elemento, que es lo que conoce como alotropía. Es el supermaterial más conocido, un material 2D formado por una sola capa de átomos de carbono. Es más fuerte que el acero, más duro que el diamante, flexible, transparente y posee excelentes cualidades de conducción.

Desde algunos años viene sonando el nombre de este material que parece abrir las puertas de un futuro muy prometedor con dispositivos electrónicos extremadamente eficientes, resistentes y capaces de superar las presentes barreras tecnológicas de la miniaturización. Este material, en el que la Comisión Europea ha anunciado inversiones de mil millones de euros durante diez años en proyectos de investigación, se acerca hacia un punto de inflexión en el que la tecnología actual dará un enorme salto cualitativo presentando dispositivos electrónicos flexibles, implantes biocompatibles de pequeño tamaño, líneas de alta tensión de alta conductividad o memorias de gran capacidad; dispositivos que se irán alejando de uno de los materiales que ha marcado la tecnología en los últimos 70 años: el silicio. En el caso del grafeno, la estructura de los átomos y los enlaces entre estos forman una especie de teselado hexagonal, igual que los panales de abeja, que comenzó a estudiarse en los años 30, aunque parezca un material muy nuevo, ya a finales de los años 40 se publicaron algunos estudios de caracterización del material. Por aquel entonces, sin embargo, se determinó que era un material inestable y no se le prestó demasiada atención.

Hubo que esperar a que André Geim y Konstantin Novoselov trabajasen, en la Universidad de Manchester, en su caracterización y su aislamiento a temperatura ambiente, un trabajo por el que recibirían el Premio Nobel de Física en el año 2010. ¿Y por qué es importante el grafeno? ¿Qué puede aportar un derivado del carbono al mundo de la tecnología? El grafeno es un material muy flexible y resistente: gran elasticidad y dureza, con una dureza muy superior a la del acero y cercana al diamante, es transparente, es capaz de autoenfriarse y autorepararse, tiene una resistividad muy baja ya que apenas se calienta al transportar corriente y, por tanto, apenas hay pérdidas por efecto Joule, consume menos energía que el silicio y también es capaz de generar electricidad en presencia de luz y, siguiendo con la comparativa con el silicio, también puede ser dopado con otros materiales para variar sus propiedades. En el ámbito de la electrónica las propiedades que presenta el grafeno han hecho que este material se haya postulado como un complemento e incluso como un sustituto del silicio en el ámbito de la electrónica y los circuitos integrados, así como la base sobre la que construir los ansiados superconductores permitiendo evolucionar las líneas de alta tensión para transportar energía de manera eficiente a los hogares.

A día de hoy, el grafeno es el eje sobre el que giran un gran número de investigaciones de todo el mundo, tanto para desarrollar procesos de fabricación del material que hagan viable su uso masivo como para su integración en dispositivos electrónicos. En el año 2008, IBM anunció uno de sus trabajos de I+D con grafeno, desarrollando transistores que trabajaban a 26 GHz, una cota que superaría años más tarde llegando a los 100 GHz y los 300 GHz. Samsung es otra de las compañías que han trabajado con el grafeno en el desarrollo de transistores y en el año 2012 presentaron el Barristor, un transistor de silicio y grafeno ideal para trabajar en aplicaciones con conmutaciones muy rápidas y abrir la puerta al desarrollo de microprocesadores capaces de alcanzar las centenas de GHz o, incluso, llegar al THz de frecuencia de funcionamiento.

¿Y por qué combinar el grafeno con el silicio? Gordon Moore, uno de los fundadores de Intel, enunció en abril de 1965 la conocida como Ley de Moore, un postulado que decía que aproximadamente cada dos años se duplicaba el número de transistores en un circuito integrado y, por tanto, también se reducía el tamaño de estos para que el factor de forma no creciese en demasía.

Este postulado, hoy en día, sigue estando vigente: nuestros microprocesadores cada vez tienen más transistores y estos son cada vez más pequeños. Sin embargo, estamos llegando a los propios límites del silicio. Dicho de otra forma, cada vez nos acercamos más a un tamaño de transistor que no se podría reducir más sin riesgo de inestabilidades, una barrera que el grafeno puede ayudar a superar y, precisamente, por eso está presente en esta nueva generación de transistores que se está desarrollando en muchos de estos centros de investigación. De hecho, tanto Samsung como la UCLA (Universidad de California – Los Ángeles) trabajan en un proyecto de investigación para miniaturizar, aún más, las memorias flash y superar la barrera de los 22 nanómetros para llegar a un objetivo de tamaño de 10 nanómetros. Memorias flash más pequeñas nos permitirían aumentar, sustancialmente, la capacidad de almacenamiento de nuestros dispositivos sin necesidad de aumentar su tamaño o su factor de forma, algo en lo que se verían beneficiados los *smartphones*, las tablets y otros dispositivos multimedia del futuro.

El grafeno está abriendo las puertas de un futuro de dispositivos mucho más pequeños, pero, a su vez, mucho más potentes: un escenario en el que podremos trabajar con dispositivos de gran velocidad y transmitir datos, de manera inalámbrica, a velocidades del orden de los terabits por segundo y visualizar toda esta información en pantallas flexibles que recuperan su forma original tras sufrir cualquier clase de deformación. ¿Y cuándo llegará este futuro tan fascinante? La respuesta a esta pregunta, realmente, no es nada sencilla, pero existen algunos estudios que apuntan a 2024 como la fecha de la explosión del grafeno. Según James D. Meindl, responsable del centro de investigación de nanoelectrónica del

Georgia Institute of Technology, el grafeno no sustituirá al silicio de los componentes y dispositivos comerciales hasta dentro de algo más de 10 años, es decir, hasta que no se alcance un punto muerto en los procesos actuales de fabricación, momento en el que la famosa Ley de Moore dejaría de cumplirse, algo que se dice que ocurrirá en 2024, cuando se llegue al límite de la tecnología con transistores de tamaño del orden de los nanómetros. Aunque el grafeno se convierta en el "material de moda", esto no implica que se abandone el silicio como la base de la tecnología; de hecho, se está viendo cómo las investigaciones caminan por una senda en la que el grafeno actúa como un complemento del silicio y son varias las voces que afirman que el grafeno no tienen por qué significar el fin de la era del silicio. En este sentido, el físico holandés Walt de Heer es una de las voces que más se ha alzado en esta tesis:"

El grafeno nunca reemplazará al silicio. Nadie que conozca el mundillo puede decir esto seriamente. Simplemente, hará algunas cosas que el silicio no puede hacer. Es como con los barcos y los aviones. Los aviones nunca han reemplazado a los barcos." Un material fascinante que, sin duda, cada vez estará más presente en baterías, pantallas y todo tipo de dispositivos que lleguen al mercado en los próximos años(21).

Una de las ventajas del grafeno respecto al silicio es extender la velocidad de los chips de silicio desde los 5 GHz a los 100 GHz de los chips de grafeno. Las propiedades de este material permiten una mejor conducción de las cargas eléctricas, y esta es una de las razones que ha permitido a IBM alcanzar los 100 GHz. "100GHz" equivalen a 100 mil millones de cambios entre "0" y "1" por segundo. Un microprocesador moderno puede efectuar solamente unos 5 mil millones de cambios por segundo. La movilidad de los portadores de carga en el grafeno lo convierten en un candidato prometedor para los dispositivos electrónicos de alta velocidad. Este material conductor es el más delgado posible, ya que solo tiene un átomo de grosor. Con el grafeno se conseguirán fabricar los transistores más pequeños y rápidos, que se hayan fabricado hasta ahora con materiales semiconductores", dicen en IBM. Esperemos que pronto se conviertan en circuitos integrados reales, que lleven el poder de nuestros ordenadores varios pasos más adelante.

Las publicaciones especializadas rebosan de artículos en los que se atribuye a esta estructura de carbono cualidad de panacea universal en la tecnología para reemplazo de dispositivos de silicio por grafeno. Pero no toda la comunidad científica comparte este optimismo como el ya mencionado célebre físico holandés Walter de Heer. Además, el grafeno carece de una banda de resistividad, propiedad esencial que le es inherente al silicio. Eso implica que el grafeno no puede dejar de conducir electricidad: no se puede apagar(22).

¿Cómo consigue entonces el grafeno extender la ley de Moore? Parece claro que consigue más ve-

locidad de CPU, pero en cuanto a tamaño, ¿qué puede decirse? El grafeno consigue extender la Ley de Moore en el sentido de que el átomo de grafeno es de menor dimensión que el átomo de silicio, tendríamos 67 pm de radio en el grafeno con respecto a 120 pm de radio medio en el silicio. Es decir, la extensión de la ley de Moore en el ámbito de los materiales se puede dar porque el tamaño del átomo del material sea inferior al tamaño del átomo de silicio.

## Nanotubos de Carbono

Es el grafeno, pero enrollado como un periódico, lo que lo hace increíblemente fuerte y conductivo. Sufre las mismas dificultades para su fabricación en masa que el grafeno. Los nanotubos de carbono son estructuras cilíndricas cuyo diámetro es del tamaño del nanómetro y desempeñan el mismo papel que el silicio en los circuitos electrónicos, pero a escala molecular donde el silicio y otros semiconductores dejan de funcionar. Un nanotubo de carbono es en realidad una única molécula que permite el desarrollo de un dispositivo electrónico. En electrónica se han detectado numerosas aplicaciones destacando la emisión de campo y en especial las pantallas planas.

Los nanotubos suelen presentar una elevada relación longitud/radio, ya que el radio suele ser inferior a un par de nanómetros y, sin embargo, la longitud puede llegar a ser incluso de  $10^5$  nm. Debido a esta característica se pueden considerar como unidimensionales(23). El nanotubo de carbono no sostenido más delgado es de 0.44 nm de diámetro. Considerando esta dimensión, los nanotubos de carbono conseguirían extender la ley de Moore.

Un grupo de científicos financiado por la Unión Europea estudió las posibilidades de uso de los nanotubos de carbono para controlar y almacenar *qubits* y avanzó un poco más hacia la obtención de un ordenador cuántico con múltiples bits. A diferencia de los bits electrónicos, que pueden tener el valor 0 o el valor 1, los *qubits* pueden tener ambos valores simultáneamente. Debido a este fenómeno mecánico-cuántico característico llamado superposición, los ordenadores cuánticos podrían ser el próximo paso en cuanto a potencia de computación y superar a los ordenadores convencionales. Sin embargo, se alteran fácilmente y pueden perder la superposición. Los esfuerzos recientes se centraron en el espín para implementar *qubits* y consiguieron inicializar, manipular y leer los *qubits* utilizando electrones confinados en un entorno en estado sólido. Dentro del marco del proyecto CARBONQUBITS (*Quantum bits in carbon nanostructures*), financiado por la Unión Europea, los científicos optaron por estudiar las posibilidades exclusivas de los nanotubos de carbono para implementar *qubits*. El equipo de CARBONQUBITS arrojó luz sobre los mecanismos físicos que afectan a la funcionalidad de los nanotubos de carbono con electrones individuales. Los resultados ampliaron los conocimientos actuales de experimentos avan-

zados. En particular, los estudios teóricos mostraron que la interacción del espín de un electrón atrapado en un nanotubo de carbono suspendido sobre una pequeña hendidura con las vibraciones del propio nanotubo de carbono puede ser muy intensa. En particular, es posible excitar un nanotubo de carbono sujeto por ambos extremos para que oscile y, al igual que una cuerda de guitarra diminuta, vibra durante un tiempo sorprendentemente largo. Si el nanotubo de carbono se sintoniza para que vaya al unísono con el espín electrónico, el cuanto de sonido emitido se puede reabsorber y reemitir muchas veces antes de perderse. El fuerte acoplamiento podría permitir la comunicación a larga distancia entre *qubits*. No obstante, para que sea útil para la computación cuántica, la escala de tiempo de la manipulación de los *qubits* debe ser mucho menor que la escala de tiempo de la pérdida de información. Un nuevo modelo teórico mostró que el tiempo necesario para controlar un *qubit* basado en el espín disminuye al aumentar la intensidad del campo de excitación hasta un valor determinado. Por encima de este valor óptimo, las inversiones del espín se ralentizan. Finalmente, los científicos analizaron cómo el espín nuclear y las impurezas cargadas limitan la vida de estos portadores de información cuántica. CARBONQUBITS ha ofrecido una nueva visión de la computación cuántica en nanotubos de carbono y presentado una forma prometedora de manipular el espín de los electrones con el fin de representar bits de información. Esto dará como resultado ventajas importantes para la posición competitiva del equipo del proyecto en el área emergente de la computación cuántica(24).

## Estaneno y otros Materiales 2D

El grafeno fue el primer material en 2D, pero se han descubierto muchos más. El estaneno es un material cuya existencia se ha demostrado teóricamente y que sería un aislante topológico, y por tanto mostraría superconductividad al conducir la electricidad por sus bordes sin resistencia a temperatura ambiente. Se compone de átomos de estaño dispuestos en una sola capa, de una manera similar al grafeno. Estaneno debe su nombre al combinar la palabra estaño con el sufijo eno por su similitud con el grafeno y el siliceno. El átomo de estaño tiene un radio medio de 145 pm(25). Desde este punto de vista tiene un radio medio superior a los 120 pm del silicio y no podría utilizarse para extender la ley de Moore desde el punto de vista del tamaño del átomo pero la adición de flúor a los átomos de la capa monomolecular de estaño podría extender la temperatura crítica hasta los 100°C. y esto lo haría práctico para su uso en circuitos integrados para hacer ordenadores más rápidos y energéticamente eficientes(26). Con respecto a otros materiales 2D podemos mencionar el siliceno(27), germaneno(28), grafeno blanco(29), fosforeno(30), disulfuro de molibdeno(31) y monóxido de estaño(32). Todos ellos ofrecen sus propias cualidades únicas de supermaterial.

## Diamantes

Además del GaN, un número de otros materiales de amplio ancho de banda existen. El más citado es el diamante que es considerado como el "material último". Sin embargo, obstáculos técnicos (falta de dopado de tipo n eficiente, canales de conductividad superficial y dificultades para hacer contactos óhmicos) han bloqueado por un tiempo la demostración de dispositivos de alto rendimiento. A pesar del espectacular progreso hecho en estos temas, no hay previstas implementaciones en el mundo real como tal, y el diamante no está incluido en la hoja de ruta. El uso de transistores, condensadores y resistencias basados en diamante sintético en lugar de silicio tiene el potencial de eliminar muchos problemas relacionados con el sobrecalentamiento, lo que permite un mejor rendimiento y la eliminación de los disipadores de calor en los dispositivos.

Es considerado por muchos como el mejor material para fabricar componentes de potencia. Tiene la mayor resistencia a la rotura de cualquier material conocido, combinado con una conductividad térmica extremadamente alta. Sin embargo, debido a la amplia banda prohibida, también es difícil encontrar un dopante adecuado para el diamante. Los demostradores iniciales de transistor están disponibles en diamante, pero se necesitará mucho trabajo para mejorar el rendimiento hacia el rendimiento práctico y demostrar las capacidades del sistema de materiales(33).

## Computación cuántica

No se entra en este apartado en excesivo detalle en la computación cuántica, ya que será objeto de otro trabajo en el que se desarrollará con mayor profundidad. La computación cuántica supone otra revolución que se aproxima ya que podría representar un nuevo paradigma con respecto a la computación clásica. Los algoritmos cuánticos manipulan los *qubits*, vinculados a sus estados indeterminados, y permiten resolver procesos masivos a gran escala, mejorando la capacidad de cómputo de forma exponencial a pesar de estar aún en desarrollo. Un ordenador cuántico es aquel que opera en un entorno cuántico constituido por partículas subatómicas, que representan la información como *quantum bits* o *qubits*, es decir, bits cuánticos, en vez de los tradicionales bits de los ordenadores clásicos. Los *qubits* pueden mantener varios estados simultáneamente y pueden estar vinculados con otros *qubits* gracias a las funciones de superposición y entrelazamiento cuántico, respectivamente.

Los algoritmos cuánticos manipulan los *qubits*, vinculados a sus estados indeterminados, y permiten resolver procesos masivos a gran escala, mejorando la capacidad de cómputo de forma exponencial. Gartner ejemplifica este nuevo paradigma mediante una librería que incluye todos los libros escritos a lo largo de la historia. Un ordenador tradicional leería de forma secuencial la totalidad de los libros para buscar

una determinada frase, mientras que un ordenador cuántico leería todos los libros de forma simultánea, con lo que esto supone desde el punto de vista de la capacidad de proceso. Sobre la computación cuántica Deloitte indica que, a pesar de ser una tecnología en desarrollo su impacto real en la industria será menor en los próximos años. Así, se entiende que este tipo de ordenadores no llegarán a sustituir al menos en unas cuantas décadas a los ordenadores clásicos; si es que algún día los llegan a sustituir. De hecho, no se espera la comercialización de ordenadores cuánticos de propósito general hasta pasado el año 2030. La computación cuántica podrá generar múltiples beneficios, pero también mayores riesgos. Así, por ejemplo, la computación cuántica representa una amenaza para la actual industria de la seguridad. Se ha constatado que la aplicación de técnicas cuánticas, como el Algoritmo de Shor, permitirá romper los actuales sistemas criptográficos, RSA y ECC. De ahí que se plantee la necesidad de desarrollar soluciones nuevas, siendo este uno de los retos derivados del desarrollo de esta tecnología en el corto plazo. En los próximos años el espacio que ocupará la computación cuántica será el de los actuales supercomputadores, equiparándose su mercado en volumen en torno a los 50 billones americanos de dólares. Será posible también acceder a una tecnología intermedia denominada NISQ (de las siglas en inglés de *Noisy Intermediate Scale Quantum*), que podría ser útil para su aplicación en determinados sectores. Cabe mencionar algunas de las aplicaciones clave de la computación cuántica referidas por Gartner:

- **Optimización de procesos.** La aplicación de esta tecnología permitirá mejorar el uso de la Inteligencia Artificial, en la medida en que permitirá acelerar sustancialmente los procesos de reconocimiento de patrones generando mayores y mejores aplicaciones.
- **Desarrollo de nuevos materiales.** La tecnología podrá utilizarse para analizar las interacciones entre partículas atómicas, apoyando el desarrollo de nuevos materiales.
- **Química.** La simulación cuántica a escala atómica permitirá el desarrollo de nuevos procesos químicos.
- **Medicina.** Se podría utilizar la tecnología para modelar interacciones a nivel atómico o predecir la interacción entre proteínas, con el fin de acelerar el desarrollo de nuevos fármacos y métodos de elaboración y aplicación de estos fármacos.
- **Biología.** La tecnología podría ser aplicada a la simulación de procesos como la fotosíntesis o para modelar sistemas vivos, permitiendo el desarrollo de nuevos fertilizantes y otras aplicaciones orientadas a mejorar los sistemas de abastecimiento de alimentos.

Es poco probable que alguna vez reemplace los chips en los teléfonos móviles, pero podría tener

aplicaciones importantes en escenarios de computación de alto rendimiento o *High Performance Computing* (HPC). Todo es muy complicado, pero el intercambio de bits binarios que son "1s" o "0s" a *qubits* que son ambos, podría mejorar la potencia de cómputo actual en importantes órdenes de magnitud y hacer que la inteligencia artificial, valga la redundancia, fuese más inteligente, el cifrado mejor y el análisis predictivo mucho más preciso. Es necesario señalar sin embargo que Juan Ignacio Cirac Sarustrain, director de la división teórica del Instituto Max-Planck de Óptica Cuántica en Garching, Alemania, ha señalado ya que se dispondrá de tecnologías cuánticas en los teléfonos móviles(34).

### Perovskita

Se trata de un material descubierto por primera vez en los Montes Urales de Rusia en 1839 por Gustav Rose. Fue bautizado así en honor al noble y experto en minerales ruso Lev Perovski (1792-1856). La perovskita podría permitir que los dispositivos electrónicos operaran en el espectro de Terahercios (THz). El uso de la luz en lugar de la electricidad para mover datos, podría aumentar la velocidad de la informática y de Internet hasta 1.000 veces. Se llama perovskita y, aunque su nombre bien podría aparecer en un cómic de superhéroes, es un material real que en pocos años podríamos tener en casa produciendo electricidad. Los científicos creen que, gracias a sus prometedoras propiedades, permitirá fabricar células fotovoltaicas más eficientes y baratas sin algunas de las desventajas que tiene el silicio, el material más usado en la actualidad en los paneles solares. Hace unos cinco años que la comunidad científica empezó a interesarse por la perovskita. Pero la perovskita que se investiga hoy en día en laboratorios de todo el mundo no es ya ese mineral descubierto en Los Urales ni un único material: "Se trata, en realidad, de una estructura cristalina que tienen muchísimos compuestos. Es un híbrido, orgánico e inorgánico, que hace que absorba muy bien la luz y sea un muy buen conductor", explica Hernán Míguez, el científico argentino del CSIC que lidera el grupo del Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla centrado en investigar la perovskita para intentar mejorar sus propiedades. "No es más que una ordenación que toman algunos minerales en la naturaleza, y el primero que se descubrió con esa estructura se llamó así. Pero son todos los materiales que tienen la fórmula química ABX<sub>3</sub>. Y las perovskitas que han atraído la atención de la comunidad científica son aquellas que son híbridas, con iones orgánicos e inorgánicos, que es lo que las hace especiales", detalla el cordobés Gabriel Lozano, científico titular del CSIC y responsable de dispositivos emisores de luz en el grupo de Materiales Ópticos Multifuncionales que dirige Míguez. "Empezamos hace tres años. Queríamos montar un equipo que pudiera abordar los problemas que tiene el campo de las perovskitas cubriendo aspectos que no estuvieran siendo investigados por otros grupos internacionalmente", relata Míguez, que trabaja en colaboración con algunos

de los laboratorios que gozan de mayor prestigio en esta área, como el del británico Henry J. Snaith, en la Universidad de Oxford, o el del sueco Anders Hagfeldt, en la Escuela Politécnica de Lausana, en Suiza. "No queríamos competir desde el punto de vista de la eficiencia, sino entender ciertos problemas que tiene el material e intentar contribuir en lo que llamamos el diseño óptico de los dispositivos, es decir, de qué forma se puede introducir un material óptico en la estructura, como una celda o un emisor de luz, y conseguir que se absorba más luz en el menor volumen posible", detalla el científico. "El material en sí mismo es mucho más fácil de fabricar y barato que el silicio porque el proceso es sencillo y se emplean materiales que no son caros", asegura Lozano. Ésta es la receta que siguen en el laboratorio para obtener una lámina de perovskita: Sobre una delgada placa de vidrio se mezclan dos sales, normalmente yoduro de plomo y yoduro de metilamonio, y se calienta a 100 grados centígrados durante 60 minutos. Además, añade Lozano, es muy tolerante a los defectos: "A diferencia de otros materiales semiconductores como el silicio, que requieren una estructura perfecta porque la presencia de defectos limita sus posibilidades de semiconductor, no necesitas una calidad excelente". Pese a las limitaciones que aún presenta, se ha convertido en uno de los materiales más interesantes que están siendo investigados en la actualidad. El Foro Económico Mundial incluyó a las celdas fotovoltaicas de perovskita en su lista de las 10 tecnologías emergentes de 2016. En este documento, elaborado conjuntamente con la revista científica *Scientific American*, cada año se seleccionan los avances más prometedores para mejorar la vida de los ciudadanos y transformar los procesos industriales. El organismo internacional destacaba la capacidad de estas celdas de generar energía limpia de forma mucho más eficiente. Y es que la eficiencia de las celdas solares ha aumentado rápidamente en pocos años: "La primera celda de perovskita que se hizo tenía una eficiencia del 3%. Hoy en día se ha superado el 20% y hace cinco años era inferior al 8%. Otras tecnologías han necesitado muchos años para recorrer ese camino", asegura Lozano que, tras acabar su tesis, se fue tres años a Holanda y en 2014 regresó a Sevilla para incorporarse al grupo que dirige Míguez. Sin embargo, todavía no se pueden comprar celdas de perovskita. "Es una tecnología incipiente y presenta problemas que aún no hemos sido capaces de resolver. El gran caballo de batalla es la estabilidad. Los dispositivos necesitan ser mucho más estables frente a la humedad, la presencia de oxígeno y la temperatura", explica Lozano. "No es estable cuando se expone a la luz, lo que supone un problema muy serio porque su principal uso es para fabricar celdas solares", apunta Míguez. "Mientras un panel solar de silicio tiene ahora una vida de 25 o 30 años, la perovskita bien encapsulada puede durar unos cuatro meses, pero luego se degrada", afirma el científico, cuyo equipo está investigando este aspecto. "Aún no se sabe cómo se va a resolver, pero en este último año hemos entendido por qué son inestables y estamos proponien-

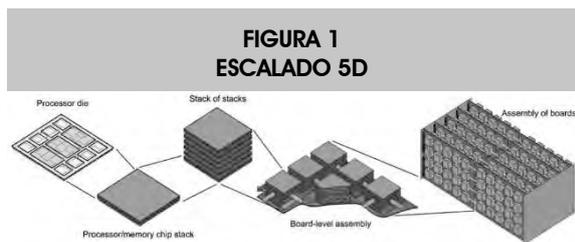
do mecanismos mediante los cuales el material se degrada por la radiación para, a partir de ahí, idear cómo solucionarlo", añade. Según Míguez, "es tan importante lo que pueden significar las perovskitas y lo que pueden dar lugar que ya se consideran entre los posibles candidatos al Nobel". De momento, el premio más prestigioso de la ciencia no ha llegado, pero las investigaciones sobre la perovskita ya están generando galardones, también en España. Y los científicos de este centro sevillano se han hecho con algunos de ellos.

¿Podrá llegar la perovskita a sustituir al silicio? «Sin duda, porque se consiguen eficiencias altas y es una tecnología relativamente económica», opina Míguez. Aunque «desde que China ha entrado en el mercado, el silicio se ha convertido en una tecnología relativamente barata», con la perovskita «el procesado de los materiales es mucho más sencillo y necesita temperaturas mucho más bajas. El gasto de energía que requiere fabricar una celda solar de silicio es muy superior al de una celda solar de perovskita», asegura. «Ya se ha logrado que sea una tecnología eficiente. Lo que hace falta ahora es que también sea estable», resume Míguez. Asimismo, una de las líneas de investigación con más posibilidades a corto plazo, según Lozano, es combinar las celdas de perovskita con las de silicio en dispositivos tándem que puedan absorber una parte más amplia del espectro electromagnético para lograr que sean más eficientes, es decir, aprovechar las ventajas de ambos para conseguir mejores resultados.

Numerosos laboratorios de todo el mundo están centrados en el desarrollo de la perovskita, tanto desde el punto de vista teórico como en sus posibles aplicaciones. España es uno de los países en los que la investigación está más avanzada. Además del equipo del Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla, un centro mixto del CSIC y la Universidad de Sevilla, hay muchos otros grupos especializados en su estudio en centros como la Universidad Jaume I de Castellón, el Instituto de Ciencia Molecular (Universidad de Valencia), el Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona (CSIC), el ICN2, la Universidad Pablo de Olavide de Sevilla y el ICIQ(35).

### Sangre Electrónica

¿Qué pasaría si se pudieran licuar productos electrónicos directamente? La 5D Electronic Blood(36) de IBM apunta a hacer precisamente eso. El aprendizaje automático es el cerebro, las VPU (unidades de procesamiento de visión) son los ojos, ¿qué más necesita una máquina para ser humana? La respuesta es sangre. Si las máquinas necesitan ser tan inteligentes como los humanos, deben funcionar de manera tan eficiente. No pueden calentarse fácilmente y deben poder regular la temperatura de manera eficiente cuando lo hacen. Eso es exactamente en lo que IBM Research, junto con sus socios, ha estado trabajando desde 2013. El proyecto real



Fuente: IBM J. RES. & DEV. VOL. 55 NO. 5 PAPER 15 SEPTEMBER/OCTOBER 2011

se llama REPCOOL. Es sinónimo de electroquímica de flujo Redox para suministro de energía y enfriamiento, pero es conocido popularmente como *Electronic Blood*.

Los chips de computadora se vuelven más potentes a medida que se acumulan más transistores en ellos. Pero los fabricantes recientemente han encontrado que es más difícil colocar más transistores en una sola oblea de silicio, lo que lleva al final de la Ley de Moore. Sin embargo, una nueva tecnología que se ha mostrado prometedora es la de los chips 3D. Esto literalmente trae chips apilados verticalmente, con piezas de memoria y lógica, uno encima del otro. Esto, a su vez, aumenta la eficiencia de los chips en términos de velocidad, pero también aumenta los problemas de calor y potencia. Los ejemplos iniciales de tales chips se pueden encontrar en la tecnología 3DXPoint de Intel y Micron. Tales chips generan mucho calor, aunque son más poderosos. *Electronic Blood* puede resolver este problema. "Para enfriar los chips 3D de manera eficiente, los científicos de IBM ya han desarrollado sistemas de prueba enfriados por fluido con estructuras de enfriamiento capilar que permiten que el fluido fluya entre las capas de chips individuales, un proceso llamado "enfriamiento entre capas" que logra una capacidad de enfriamiento de  $3 \text{ kW} / \text{cm}^3$ ".

El equipo de IBM Research ha llevado este enfoque un paso más allá ahora, al desarrollar un sistema integrado de refrigeración y distribución de energía. Esto se basa en una batería de flujo electroquímico para abordar el desafío de la fuente de alimentación de manera sostenible. Los investigadores quieren reemplazar los cables con sangre electrónica, que fluye a través de pequeños tubos, similares a los capilares sanguíneos. "A diferencia de las baterías convencionales, que almacenan energía en materiales de electrodos sólidos, una batería de flujo transporta energía simplemente haciendo circular los químicos redox. Por lo tanto, los electrolitos se cargan mediante una celda electroquímica llamada electrolizador y se descargan a través de numerosos electrodos receptores distribuidos en una sola capa de una pila de chips 3D. Parece bastante increíble, pero ya existen grandes baterías de flujo electroquímico, y se utilizan para el almacenamiento de electricidad a escala de red a partir de fuentes renovables. *Electronic Blood* es como una versión en miniatura mejorada de la tecnología existente. El proyecto, en esencia, es una batería Redox Flow

que ha existido durante años, pero IBM Research lo está llevando a un nivel que nunca antes se había hecho. El líquido utilizado es vanadio.

¿Por qué se necesita? Hasta ahora, la Ley de Moore había asegurado que el rendimiento de los chips de computadora se duplicara cada 18 meses. Al hacerlo, el consumo de energía también aumentó. "La desventaja es que el consumo de energía también ha crecido al mismo ritmo. Se espera que esta tendencia de rendimiento cada vez mayor de la computadora se empuje a la escala zeta en las próximas décadas. Tales sistemas podrían realizar  $10^{21}$  operaciones computacionales por segundo, que es aproximadamente 30.000 veces más de lo que pueden hacer los mejores sistemas informáticos actuales". Sin embargo, con la obsolescencia de la Ley de Moore, es más difícil agregar transistores a una oblea de silicio y mejorar el rendimiento. Por lo tanto, las empresas están buscando nuevas formas de hacerlo, con el apilamiento de chips 3D como una de dichas formas. El brazo de investigación de IBM también está realizando investigaciones sobre computación cuántica, computación neuromórfica y nanotecnología, que son importantes para abordar el final de la Ley de Moore. La gran fortaleza de la sangre electrónica es que es el punto final de una nueva hoja de ruta de densidad que utiliza encapsulados móviles y portátiles densos para obtener sistemas más compactos y combina esto con el esfuerzo de investigación en encapsulados 3D para permitir que los factores de mayor densificación excedan 1.000.000x. La hoja de ruta comienza inmediatamente con los primeros puntos de prueba como el microservidor más denso 1000x. Se basa en la tecnología CMOS existente y es totalmente compatible con versiones anteriores o heredadas en la pila de software, capacidades que la computación cuántica y la computación neuromórfica no tienen. En manufactura de circuitos integrados e ingeniería electrónica, el encapsulado es el resultado de la etapa final del proceso de fabricación de dispositivos con semiconductores, en la cual un semiconductor o un circuito integrado; se ubica en una carcasa para protegerlo de daño físico, de la corrosión, evacuar el calor generado y a su vez permitirle la comunicación con el exterior mediante contactos eléctricos(37).

La hoja de ruta de densidad y sangre electrónica no solo es importante, sino que reemplaza la obsoleta Ley de Moore con una nueva "ley" basada en la densificación volumétrica, en lugar de la densificación superficial. IBM Research ve las primeras aplicaciones de *Electronic Blood* en 2030, que están a solo 10 años de distancia. Dados los recientes avances en el aprendizaje automático y otras técnicas informáticas, el progreso parece encaminarse. Los algoritmos informáticos avanzados, como los utilizados en el aprendizaje automático, requieren bastante potencia, especialmente cuando se utilizan en escalas más grandes, y eso, como se mencionó anteriormente, aumenta los requisitos de potencia y disipación de calor. "La investigación que el equipo desarrolla dentro del proyecto REPCOOL escalará

de supercomputadoras a computadoras en la nube y dispositivos portátiles, pero es demasiado pronto para hacer predicciones en este momento”.

No hay máquina más perfecta que el ser humano. IBM desde hace veinte años se mantiene como la compañía del mundo que más patentes registra. El año pasado certificaron un total de 6.478, cifra que no alcanza la suma de las patentes de Accenture, Amazon, Apple, HP, Intel y Oracle. El más reciente hallazgo de la compañía en esta silenciosa carrera de innovación es la sangre electrónica. En realidad, se trata de un fluido -electrolitos- cuya misión es refrigerar al mismo tiempo que nutre de energía los ordenadores a través de una red de tubos de silicio que imita el sistema circulatorio humano. Partiendo de la base de que el cerebro humano es el ordenador más eficiente -en un día, consume 20 vatios- IBM pretende maximizar el aprovechamiento de energía imitando su estructura. El objetivo de fabricar computadoras más potentes y pequeñas. En ese sentido, estiman que en 2060 un ordenador con una capacidad de procesamiento de un petaflop, que hoy ocuparía medio campo de fútbol, cabrá en un escritorio. Actualmente, los ordenadores gastan el 99% de su energía en el proceso de refrigeración. El cerebro, sólo un 10%. IBM empezó a trabajar en esta tecnología en los 60, en aquel tiempo utilizando agua -una idea que recuperó en 2008-, pero en 1995 abandonó las investigaciones. Ahora, ya cuentan con un prototipo, Aquasar, el primer sistema informático del mundo basado en bioprocesadores.

Las propiedades de la sangre podrían ser clave en el futuro de la informática. La sangre en nuestro organismo tiene funciones como distribuir energía y mantener estable la temperatura. ¿Por qué no emularla en informática como sangre electrónica? Uno de los grandes problemas de la informática, contemporánea y primitiva, ha sido siempre la dificultad de lidiar con el espacio, el calor y el consumo de energía. Por ello, para traer más potencia y optimización al mercado, los ingenieros siempre han tenido que pensar, en primer lugar, en aspectos como la refrigeración líquida. De hecho, debido a los avances con esta última, se está trascendiendo de los ordenadores de escritorio al mundo móvil, donde también se necesita progresión en ese sentido. El reto de la informática está en, además, hacerlo todo en tamaños más pequeños, con el objetivo de que el *hardware* ocupe menos y gracias a ello, sea más transportable y almacenable, hasta alcanzar hitos como la revolución móvil que se está viviendo a nivel mundial.

Una solución a los problemas mencionados, que en ciertos casos ya se emplea, es la técnica de apilar unos componentes encima de otros, pero esto trae consigo problemas añadidos, y existe mucha dificultad para crear chips que puedan recibir energía y refrigerarse de manera estable estando apilados de manera vertical. En el cuerpo humano, la sangre tiene la capacidad de entregar energía y de refrigerar, por lo que emular esto en computación puede tener sentido. En IBM lo creen y están experimentando con

ello, según cuentan en Ars Technica. Por supuesto, aunque se le llame “sangre 5D”, esta nueva técnica no es más que una inspiración en cómo funciona a nivel biológico el organismo. Llamar a esto “cinco dimensiones” responde más a marketing que a complejidad real, ya que, más allá de las 3 dimensiones, la cuarta y la quinta expresan la capacidad de transmitir energía y refrigerar.

De momento, las pruebas consisten en proporcionar 0.010 W a un chip, y en esas cifras, el proceso funciona bien. Aplicando principios de refrigeración líquida anteriores se solventa una parte importante, por lo que la dificultad pasa por la entrega de energía, donde entra en juego un ciclo de carga y descarga en el que ciertos componentes del líquido se oxidan. La sangre electrónica se encontraría dentro del ámbito de los Sistemas bioinspirados. Los sistemas bioinspirados son sistemas construidos por medio de *hardware* configurables y sistemas electrónicos que emulan la forma de pensar, el modo de procesar información y resolución de problemas de los sistemas biológicos(39).

### Neuroelectrónica

El cerebro humano es muy bueno para aprender cosas de una manera rápida y eficiente. IBM está trabajando en neuronas artificiales que puedan disparar y transportar un pulso eléctrico de manera similar a las propias neuronas humanas, lo que significaría que las máquinas podrían llegar a pensar de forma más parecida a los humanos. Una parte importante del esfuerzo colosal asociado con la comprensión del cerebro implica el uso de tecnología de *hardware* electrónico para reproducir el comportamiento biológico en silicio. La idea gira en torno a aprovechar décadas de experiencia en la industria electrónica, así como nuevos hallazgos biológicos que se emplean para reproducir comportamientos clave de elementos fundamentales del cerebro, en particular, neuronas y sinapsis, en productos de escala de velocidad mucho más grandes que cualquier implementación solo de *software* puede lograr para el nivel dado de detalle de modelado. Hasta ahora, el campo de la ingeniería neuromórfica ha demostrado ser una fuente importante de innovación hacia el objetivo del “cerebro de silicio”, con los métodos empleados por su comunidad centrados en gran medida en el diseño de circuitos de señal analógica, digital y mixta y estándar, y la tecnología CMOS como las “herramientas de elección” preferidas cuando se trata de simular o emular el comportamiento biológico. Sin embargo, junto con el sector de la comunidad orientado a los circuitos, existe otra comunidad que desarrolla nuevas tecnologías electrónicas con el objetivo expreso de crear dispositivos avanzados, más allá de las capacidades de CMOS que pueden simular intrínsecamente un comportamiento similar a las neuronas o las sinapsis. Un ejemplo notable se refiere a dispositivos nanoelectrónicos que responden a señales de entrada bien defini-

das cambiando adecuadamente su estado interno ("peso"), exhibiendo así una plasticidad "similar a una sinapsis". Esto está en marcado contraste con los enfoques orientados a circuitos donde la variable de "peso sináptico" debe almacenarse primero, generalmente como carga en un condensador o digitalmente, y luego cambiarse adecuadamente a través de un circuito complicado. El cambio de gran complejidad de los circuitos a los dispositivos podría ser un factor habilitador importante para la "electrónica sináptica" a muy gran escala, particularmente si los nuevos dispositivos pueden funcionar con presupuestos de energía mucho más bajos que sus correspondientes reemplazos de circuitos "tradicionales". Para hacer realidad esta promesa, la sinergia entre las prácticas bien establecidas del enfoque orientado a los circuitos y la inmensidad de posibilidades abiertas por el advenimiento de nuevos dispositivos nanoelectrónicos con una dinámica interna rica es esencial y creará la oportunidad para la innovación radical en ambos campos. El resultado de tal sinergia puede tener un impacto potencialmente asombroso en el progreso de nuestros esfuerzos para simular el cerebro y finalmente comprenderlo. En este tema de investigación, se desea proporcionar una visión general de lo que constituye el estado del arte en términos de tecnologías habilitadoras para la electrónica sináptica a gran escala, con especial énfasis en dispositivos nanoelectrónicos innovadores y técnicas de diseño de circuitos y/o sistemas que pueden facilitar el desarrollo de sistemas electrónicos inspirados en el cerebro a gran escala(40).

Y, por último, la computación neuromórfica. La computación neuromórfica replica, con transistores, el comportamiento de un cerebro biológico. Implica la conexión masiva de millones de elementos pequeños, el equivalente a las neuronas, en lugar de pocos y más grandes". La idea de replicar con una máquina el funcionamiento del cerebro no es nueva, lleva dando vueltas desde la década de los 80, pero es apasionante. No sólo daría lugar a chips más eficientes, sino que allanaría el camino, en parte, hacia la inteligencia artificial. El punto crítico tras la muerte de la ley de Moore no es sólo que reducirá el crecimiento tecnológico, en cualquiera de sus formas, sino que detrás de él irá también en parte el económico. El auge de compañías como Apple, Google, Pixar o Dreamworks se debe en gran parte a la progresión que supone la ley. Podremos intentar emular un crecimiento, podremos ver periodos de crecimiento acelerado aquí y allá, pero de momento no parece que un crecimiento exponencial sostenido durante seis décadas, como ha ocurrido con Moore, vaya a ocurrir. ¿Qué ocurrirá cuando la Ley de Moore decida, definitivamente, dejar de aplicarse? Nadie lo sabe, no a ciencia cierta al menos. Pero será divertido descubrirlo.

La integración FD-SOI[2] y 3D puede responder a futuros enfoques de computación cuántica y neuromórfica(41).

## Ordenadores biológicos

Más allá de imitar la biología, algunas compañías están tratando de usar la biología en las máquinas. Compañías como Microsoft están usando ADN artificial para el almacenamiento de datos, mientras que los investigadores están investigando la escritura de códigos en bacterias o el uso de proteínas que se encuentran en el cuerpo humano dentro de los microchips. Se trata del otro enfoque, en vez de imitar la biología mediante los computadores, se trata de utilizar la biología para construir computadores. La molécula de ADN mide unos 2 nanómetros o 20 Angstrom(42), es decir 2.000 picómetros. Por lo tanto, parece difícil que los ordenadores biológicos con un tamaño de la molécula de ADN, más de 8 veces mayor que el átomo de silicio pueda seguir la Ley de Moore.

## Microchips biodegradables

Como los residuos electrónicos son un problema cada vez más grande, tener una electrónica que pueda degradarse de una manera no dañina es una gran promesa. La Universidad de Wisconsin-Madison ha estado trabajando en una forma de reemplazar los materiales nocivos en semiconductores como el arseniuro de galio con una capa delgada de cristales de madera unidos con resina epoxi. La electrónica resultante se puede disolver en un vaso de agua y aun así ser más potable que el promedio de agua del grifo.

## CONCLUSIONES SOBRE LAS DOCE LÍNEAS DE PROGRESO EN EL *HARDWARE* PARA EXTENDER LA LEY DE MOORE

En cuanto a las técnicas de litografía ultravioleta extrema (EUV), parece que llegaron ya a su límite y no se espera que puedan fabricarse con esta tecnología chips de tamaño inferior a los 5 nanómetros, además, son muy pocas empresas las que cuentan con esta tecnología tan específica. Lo mismo sucede con los tubos de vacío microscópicos, en los que trabajan centros de investigación muy especializados y la NASA para su aplicación en el sector del espacio con el objeto de conseguir chips resistentes a la radiación, pero para su fabricación se están utilizando las mismas técnicas de litografía con sus mismas limitaciones. Realizado este estudio comparativo se podría concluir que tanto el grafeno como los nanotubos de carbono podrían extender la ley de Moore, debido a la dimensión del átomo de carbono, más pequeño que el átomo de silicio y a sus excelentes propiedades térmicas, entre otras muchas propiedades excelentes de las que goza el grafeno. Sin embargo, el problema actual es su manufacturabilidad en masa. El estano y otros materiales 2D tienen también buenas propiedades térmicas pero sus dimensiones son también superiores a las del átomo de silicio. Los diamantes están también basados en el átomo de carbono si bien presentan algunos problemas que impiden implementaciones en el mundo real, y su principal

uso sería en aplicaciones de potencia. La perovskita es una molécula de dimensión superior al átomo de silicio resultando de utilidad para sustituir al silicio en la fabricación de celdas solares, pero quizás no para conseguir sustituirlo para continuar con el progreso de la ley de Moore. Hay diferentes centros de investigación y universidades españolas trabajando en este material. Es un material que tiene también buenas propiedades para conseguir mayor ancho de banda y velocidad en las comunicaciones y por lo tanto en el Internet de alta velocidad. La sangre electrónica permite apilar chips en 3D proporcionando una adecuada refrigeración y podría ser también una línea de progreso en el *hardware*, si bien muy pocas compañías y muy especializadas se encuentran involucradas en esta línea. La neuroelectrónica trata de simular el comportamiento del cerebro, pero si se implementa en silicio adoptará de los mismos problemas generales que el silicio para continuar con el progreso impuesto por la ley de Moore y los ordenadores biológicos están basados en moléculas de ADN que tienen también unas dimensiones superiores a las del átomo de silicio. En cuanto a los microchips biodegradables, son componentes cuyo interés fundamental es desde el punto de vista medioambiental, pero dependiendo del material en el que se implementen se conseguiría o no el progreso en la ley de Moore. Por todo lo expuesto, sin lugar a dudas, de las 12 posibles líneas de progreso en el *hardware*, que se han descrito, y sin menoscabo de las otras, la computación cuántica parece una de las más prometedoras. Frente a los computadores clásicos, basados en los bits, la computación cuántica, basada en *qubits*, es la computación del futuro.

En este sentido, la Unión Europea ha consolidado su apuesta por ella de la mano de la iniciativa *The Quantum Technologies Flagship*. Esta iniciativa tendrá una duración de diez años, con un presupuesto previsto de 1.000 millones de euros. En su fase de aceleración, desde octubre de 2018 a septiembre

de 2021, aportará 132 millones de euros de financiación para 20 proyectos en cuatro áreas de aplicación: comunicación cuántica, simulación cuántica, computación cuántica y metrología y sensores cuánticos. Un capital al que accederán, de manera especial, las empresas industriales, quienes, como refleja la misma Comisión Europea en un comunicado de prensa, representan más de un tercio de los participantes en el proyecto. Más de 5.000 investigadores residentes de la UE y países asociados, también involucrados en el proyecto, participarán.

*The Quantum Technologies Flagship* apuesta por el desarrollo a largo plazo de una red cuántica, donde los ordenadores, simuladores y sensores cuánticos estén interconectados a través de redes cuánticas que distribuyan la información y los recursos cuánticos. Es decir, se trata de crear una única red de comunicación cuántica. Un sueño que, en última instancia, produciría una potencia informática sin precedentes, garantizando la privacidad de los datos y la seguridad de las comunicaciones, y proporcionando al mismo tiempo una sincronización y mediciones de precisión ultra-alta para una variada gama de aplicaciones disponibles, tanto a nivel local como a nivel *Cloud*.

■ **Juan Miguel Ibáñez de Aldecoa Quintana**

## BIBLIOGRAFÍA

NEREID. *NanoElectronics Roadmap for Europe. From Nanodevices and Innovative Materials to System Integration*. <https://www.nereid-h2020.eu/roadmap>

Turing. La computación. Pensando en máquinas que piensan. RBA

Las tecnologías cuánticas. La física que revolucionará las máquinas. Eduardo Arroyo

Simulando la física con los computadores. Richard P. Feynman

Cuántica. Jim Al-Khalili. Alianza Editorial

## NOTAS

- (1) <https://www.idgconnect.com/idgconnect/analysis-review/1018290/technologies-extend-moores-law>
- (2) Las tecnologías cuánticas. La física que revolucionará las máquinas. Eduardo Arroyo
- (3) [https://en.wikipedia.org/wiki/Dennard\\_scaling](https://en.wikipedia.org/wiki/Dennard_scaling)
- (4) Chip wars. América, China and silicon supremacy. The Economist. December 1st-7th 2018
- (5) [https://elpais.com/tecnologia/2016/10/19/actualidad/1476873307\\_047514.html](https://elpais.com/tecnologia/2016/10/19/actualidad/1476873307_047514.html)
- (6) <https://es.wikipedia.org/wiki/Silicio>
- (7) Microelectrónica. La historia de la mayor revolución silenciosa del siglo XX. Ignacio Mártel
- (8) <https://www.microwavejournal.com/articles/32538-g-power-amplifier-design-and-modeling-for-mmwave-gan-devices>
- (9) Design of a millimeter-wave wideband and high linearity integrated sigebicmos transmitter for multi-gbps point-to-point communications. David del Río Orduña.
- (10) <https://valenciaplaza.com/vodafone-enciende-la-primera-red-comercial-5g-de-espana-en-valencia-y-otras-14-ciudades>

- (11) <https://www.heraldo.es/noticias/sociedad/2018/03/05/paso-tecnologia-del-carburo-silicio-1227230-310.html#>
- (12) <https://lapastillaroja.net/2016/09/computacion-cuantica/>
- (13) <https://www.idgconnect.com/idgconnect/analysis-review/1018290/technologies-extend-moores-law>
- (14) Desde Einstein a Instagram a saltos cuánticos. Sergio C. Fanjul
- (15) <https://www.idgconnect.com/idgconnect/analysis-review/1018290/technologies-extend-moores-law>
- (16) <http://neofronteras.com/?p=3841>
- (17) <https://www.xataka.com/investigacion/los-tubos-de-vacio-regresan-un-siglo-despues-y-quieren-sustituir-a-los-transistores>
- (18) <https://www.efesalud.com/diferencias-entre-virus-y-bacterias-desde-su-tamano-hasta-su-tratamiento/>
- (19) <https://www.saberdeciencias.com/apuntes-de-virologia/171-virologia-los-virus-caracteristicas-generales-tamano>
- (20) <https://www.nytimes.com/2016/06/06/technology/smaller-chips-may-depend-on-technology-from-grand-mas-radio.html>
- (21) <https://blogthinkbig.com/grafeno-nueva-era-electronica>
- (22) [https://es.wikipedia.org/wiki/Grafeno#cite\\_note-neutralidad-19](https://es.wikipedia.org/wiki/Grafeno#cite_note-neutralidad-19)
- (23) <https://es.wikipedia.org/wiki/Nanotubo>
- (24) <https://ciencia.estudiareneuropa.eu/s/3972/76708-Informacion/4086476-Nanotubos-de-carbono-como-bits-cuanticos-para-computacion.htm>
- (25) <https://es.wikipedia.org/wiki/Esta%C3%B1o>
- (26) <https://es.wikipedia.org/wiki/Estaneno>
- (27) <https://es.wikipedia.org/wiki/Siliceno>
- (28) <https://en.wikipedia.org/wiki/Germanene>
- (29) <https://www.pheneovate.com/news-notes/what-is-white-graphene>
- (30) <https://en.wikipedia.org/wiki/Phosphorene>
- (31) [https://es.wikipedia.org/wiki/Disulfuro\\_de\\_molibdeno](https://es.wikipedia.org/wiki/Disulfuro_de_molibdeno)
- (32) [https://en.wikipedia.org/wiki/Tin\(II\)\\_oxide](https://en.wikipedia.org/wiki/Tin(II)_oxide)
- (33) NEREID. NanoElectronics Roadmap for Europe.From Nanodevices and Innovative Materials to System Integration
- (34) [https://retina.elpais.com/retina/2018/10/20/tendencias/1540022033\\_896762.html](https://retina.elpais.com/retina/2018/10/20/tendencias/1540022033_896762.html)
- (35) <https://www.elmundo.es/ciencia-y-salud/ciencia/2018/01/29/5a64c234268e3e497a8b4601.html>
- (36) <https://www.digit.in/features/general/electronic-blood-29843.html>
- (37) [https://es.wikipedia.org/wiki/Encapsulado\\_\(Electr%C3%B3nica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Encapsulado_(Electr%C3%B3nica))
- (38) <https://hipertextual.com/2015/11/sangre-electronica-informatica>
- (39) [https://es.wikipedia.org/wiki/Sistemas\\_bioinspirados](https://es.wikipedia.org/wiki/Sistemas_bioinspirados)
- (40) Enabling Technologies for Very Large-Scale Synaptic Electronics
- (41) NEREID. NanoElectronics Roadmap for Europe
- (42) [https://www.google.com/search?q=cuanto+mide+el+adn&rlz=1C1GCEU\\_esES819ES819&oq=cuanto+mide+el+adn&aqs=chrome..69l57.4135j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8](https://www.google.com/search?q=cuanto+mide+el+adn&rlz=1C1GCEU_esES819ES819&oq=cuanto+mide+el+adn&aqs=chrome..69l57.4135j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8)

## REFERENCIAS

- [1] [https://youtu.be/7uvUiq\\_jTLM](https://youtu.be/7uvUiq_jTLM)
- [2] *Fully Depleted Silicon-On-Insulator*