"AL 50º ANIVERSARIO DE LA LEY DE MOORE, LA NANOELECTRÓNICA EN UNA ENCRUCIJADA"

Jesús A. del Alamo
Dr. Ingeniero de Telecomunicación

Microsystems Technology Laboratories
Massachusetts Institute of Technology

DISCURSO DEL ACTO DE INVESTIDURA COMO DOCTOR HONORIS CAUSA DEL PROF. JESÚS DEL ÁLAMO

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

23 DE NOVIEMBRE DE 2015

"AL 50º ANIVERSARIO DE LA LEY DE MOORE, LA NANOELECTRÓNICA EN UNA ENCRUCIJADA"

Representa un gran placer para mí el compartir hoy con ustedes algunas reflexiones sobre la nanoelectrónica con motivo del cincuenta aniversario de la Ley de Moore.

También les daré una idea de los esfuerzos de mi grupo de investigación en MIT en el desarrollo de este campo en estos últimos años.

En esta especial ocasión del 50 aniversario de la Ley de Moore, celebramos los sorprendentes logros alcanzados en la microelectrónica en los últimos cincuenta años. A decir verdad, en este punto debemos realmente hablar de nanoelectrónica, como les mostraré más adelante.

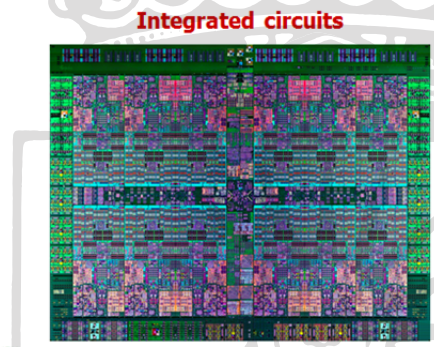
Este aniversario ha despertado preocupaciones acerca del progreso de la nanoelectrónica. Es más, recientemente ha habido comentarios en la prensa popular sugiriendo el fin de la Ley de Moore en un futuro próximo.

¿Es esto una preocupación con fundamento real? ¿Cuáles serían las consecuencias? En cualquier caso, ¿qué es realmente la Ley de Moore? Estos son algunos de los temas que quiero analizar hoy en esta presentación.

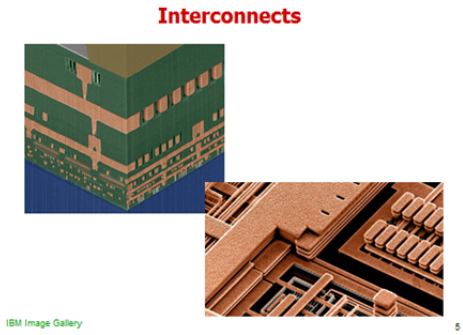
Seguro que están ustedes de acuerdo conmigo cuando digo que la nanoelectrónica es el pilar de nuestra sociedad moderna. Si abrimos cualquier artilugio, como por ejemplo el *smartphone* aquí mostrado, encontramos varios diminutos paquetes negros que tienen la apariencia de cucarachas con muchas patas.

Si los abrimos, encontramos en su interior coloridos microchips hecho de silicio con gran cantidad de rasgos grabados en ellos.

Aquí tenemos una mejor perspectiva de uno de esos microchips o circuitos integrados, nombre con el que preferimos referirnos a ellos. Estoy seguro de que coinciden conmigo en que se les ve realmente fotogénicos.



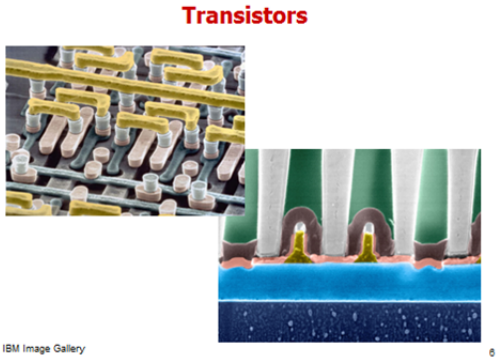
Este en particular es un microprocesador fabricado recientemente por IBM. Recibe el nombre de *Power* 8 y utiliza una de las tecnologías de fabricación más avanzadas. Tiene un tamaño de, aproximadamente, 3x2 cm y contiene más de 5 miles de millones de transistores!. Esto es en esencia el estado del arte actual.



Si miramos más a fondo en un circuito integrado vemos que hay muchos niveles de interconexiones que conectan diferentes componentes del chip. Las interconexiones superiores son más gordas porque transportan mayor corriente ya que conectan partes del chip que están más lejanas entre sí. Cuanto más profundas están, más finas son las conexiones metálicas.

Si llegamos hasta la superficie del semiconductor, vemos una abundante red de interconexiones locales. Bajo éstas, en el interior del semiconductor, están los transistores, como pueden ver en esta sección transversal. Aquí hay una pareja de transistores. Cada transistor tiene tres terminales. Este par de transistores comparte uno de los contactos.

Las dimensiones que estamos viendo aquí son ya en el rango de unos pocos nanómetros. En unos minutos les daré un mejor sentido del tamaño de los transistores.



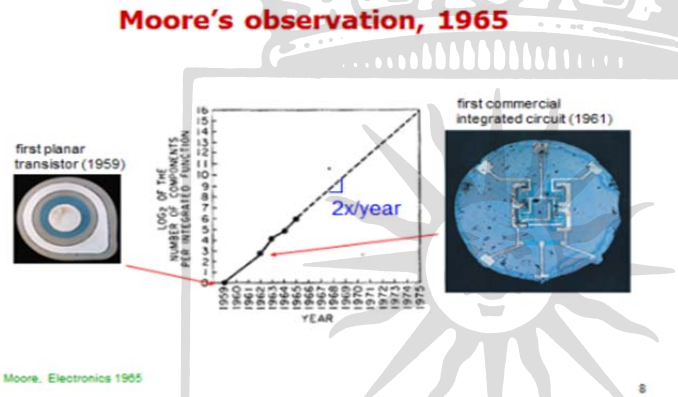
Tras esta breve introducción, podemos centrarnos finalmente en la Ley de Moore. ¿Qué es la Ley de Moore?

Cuando hace unos meses se le pregunto a Gordon Moore en una entrevista con motivo del cincuenta aniversario de la enunciación de esta ley, él respondió que no es una ley en un aspecto real sino que es una observación y una proyección.

Echémosle un vistazo al artículo original al que él se refiere.

En 1965, Gordon Moore era un ingeniero que trabajaba en circuitos integrados en *Fairchild Semiconductor.*

El primer "transistor planar" había sido diseñado unos pocos años antes en 1959. El diseño era tal

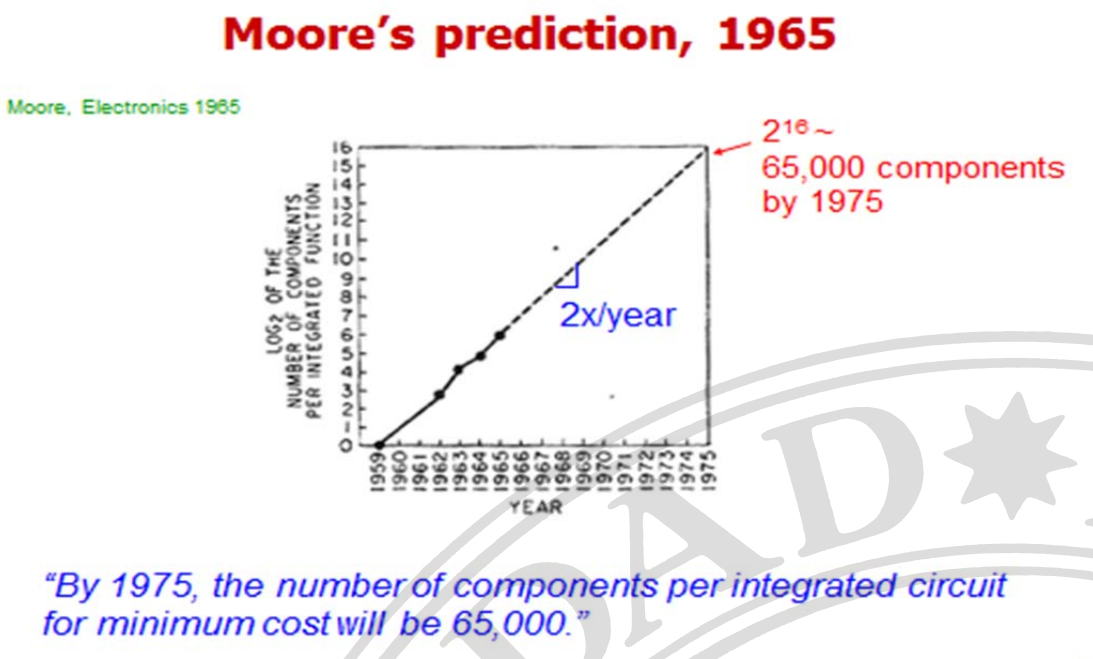


que permitía integrar varios transistores juntos en el mismo chip semiconductor lado a lado sin que interaccionasen entre sí.

Era tan solo cuestión de tiempo que se dieran cuenta que podrían fabricarse conexiones metálicas justo sobre la superficie del chip conectando eléctricamente los transistores entre ellos. Esto fue lo que hizo posible la aparición del circuito integrado, demostrado por primera vez en 1961.

Ya en el año 1965, circuitos integrados con hasta 60 componentes (la mayoría de ellos transistores) eran completamente funcionales. Cuando Gordon Moore representó el número de componentes en función del tiempo en una escala semilogarítmica, se dio cuenta de que la tasa de crecimiento era constante con el número de componentes doblándose cada año.

Esta fue la observación clave de Moore.



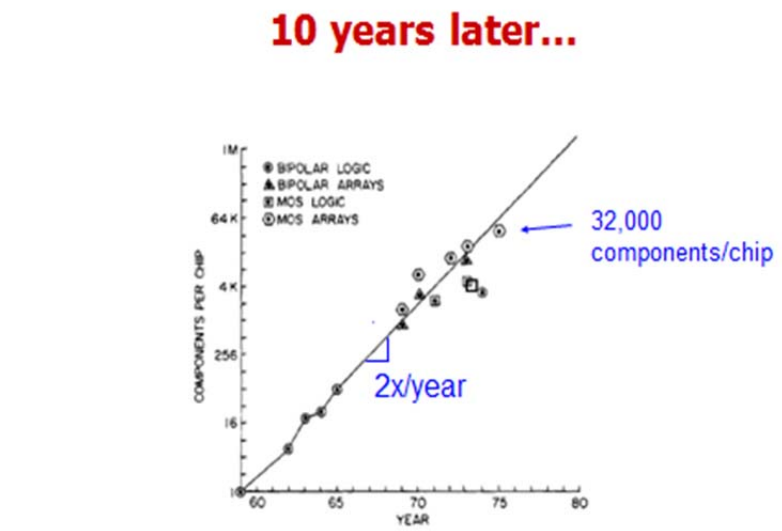
Como buen ingeniero, una vez que dedujo una relación, Moore paso a hacer predicciones. A este ritmo de crecimiento con un factor de 2 cada año, en 10 años, Moore calculó, debería ser posible obtener circuitos integrados con 65000 componentes.

A mí esto me parece una declaración sorprendente. Desde un punto en el que el estado del arte era de 60 componentes por circuito integrado, él aseguraba que debería ser posible aumentar esto en un factor de 1000 en los próximos 10 años. Requiere mucha fe el aventurarse de esta manera en predecir el futuro.

¿Y cómo resultó esta predicción?. Veamos lo que paso 10 años más tarde, en 1975.

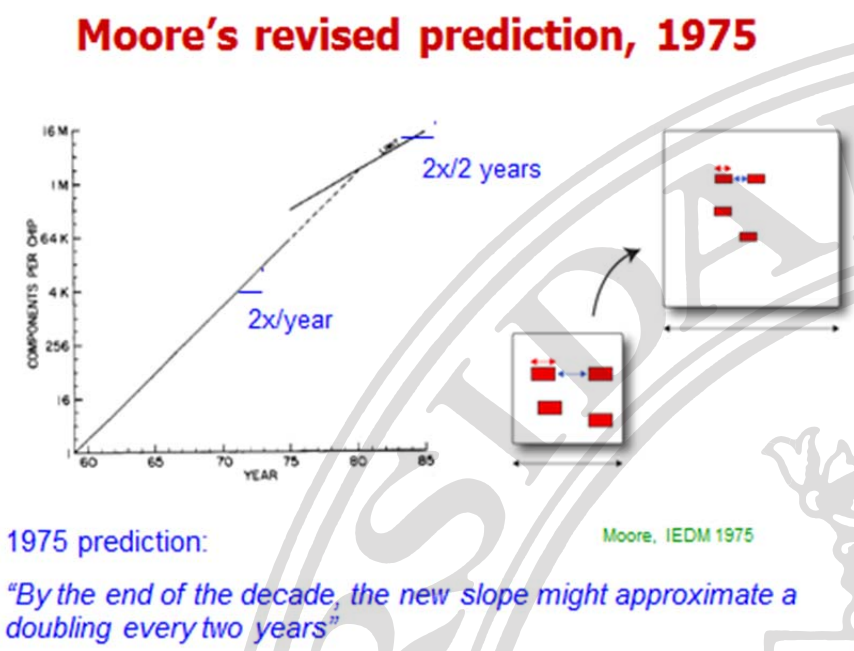
En 1975 Moore ya estaba en Intel, una compañía que él cofundó en 1968. Fue invitado a dar una conferencia y se le pidió que evaluase hasta qué punto la ya famosa Ley de Moore se había cumplido.

Una vez más enseñó una gráfica que mostraba el número de componentes por circuito integrado en función del tiempo. Estos son los puntos de la gráfica original de 1965 y estos son los puntos nuevos correspondientes a circuitos realizados en la década que siguió.



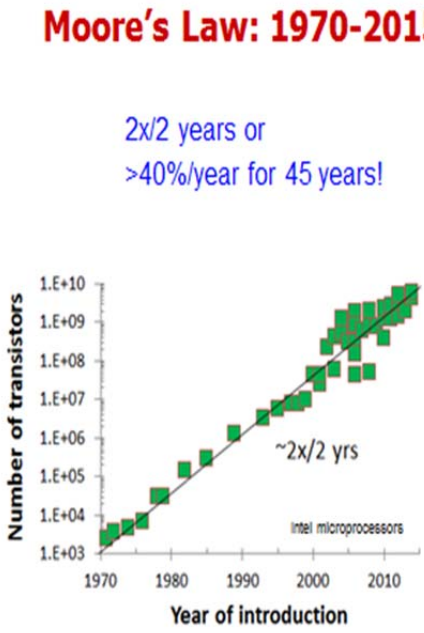
Como pueden ver, la predicción original no estuvo muy lejos. En 1975, circuitos integrados con 32000 componentes ya habían sido producidos. Solamente un factor de dos por debajo de lo que Moore esperaba.

Envalentonado por su éxito, en la misma charla, Moore pasó una vez más a predecir el futuro. Sorprendentemente, arguyó que hacia el final de esa década, la de los 70, la tasa de progreso se ralentizaría a la mitad. Eso implicaba doblar el número de componentes cada dos años en lugar de cada año.



Su argumento era el siguiente. La complejidad del progreso en los circuitos integrados se veía afectada por tres factores. Los chips se estaban volviendo más grandes, los transistores más pequeños y también la distancia entre componentes se estaba reduciendo, es decir, se estaba empaquetando el chip de forma más eficiente.

Es el progreso en este último factor lo que Moore dijo que se ralentizaría. En algún momento dado, los componentes serian empaquetados de manera tan eficaz que sería difícil hacerlo mucho mejor. Consecuentemente, la tasa total de integración debería ralentizarse.



¿Acertó con esta revisión de la ley de Moore?

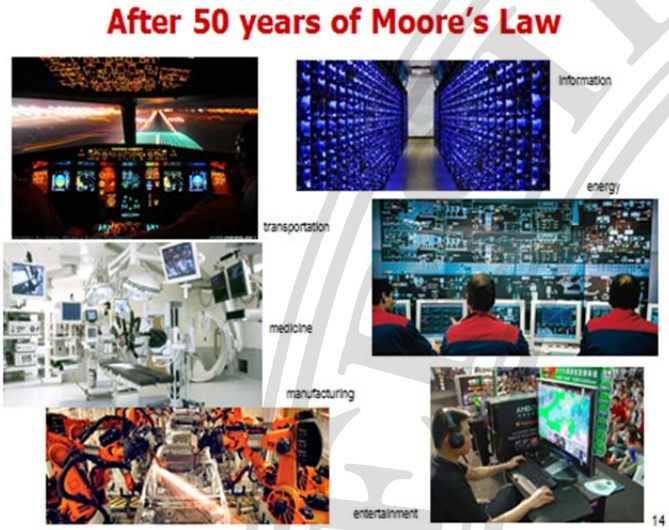
Una manera sencilla de evaluarlo es mirando el progreso en los microprocesadores. Los microprocesadores esencialmente son ordenadores en un solo chip.

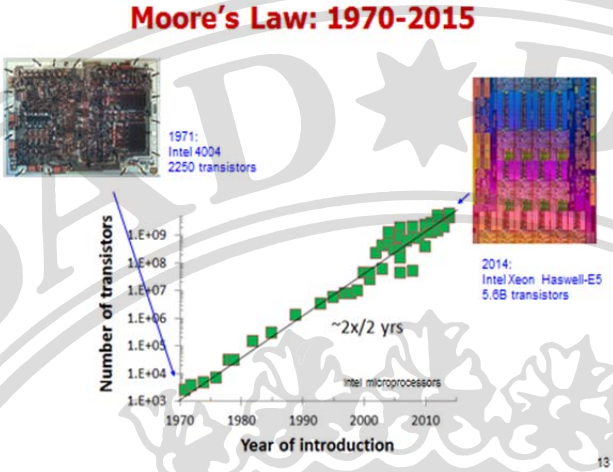
Si miramos al número de transistores en los microprocesadores de Intel en función del tiempo desde 1971 hasta este año, vemos una tasa de aumento del doble cada dos años, justo como Moore predijo.

Dicho de otra forma, esto representa un factor de crecimiento de más del 40% por año durante 45 años sin parar.

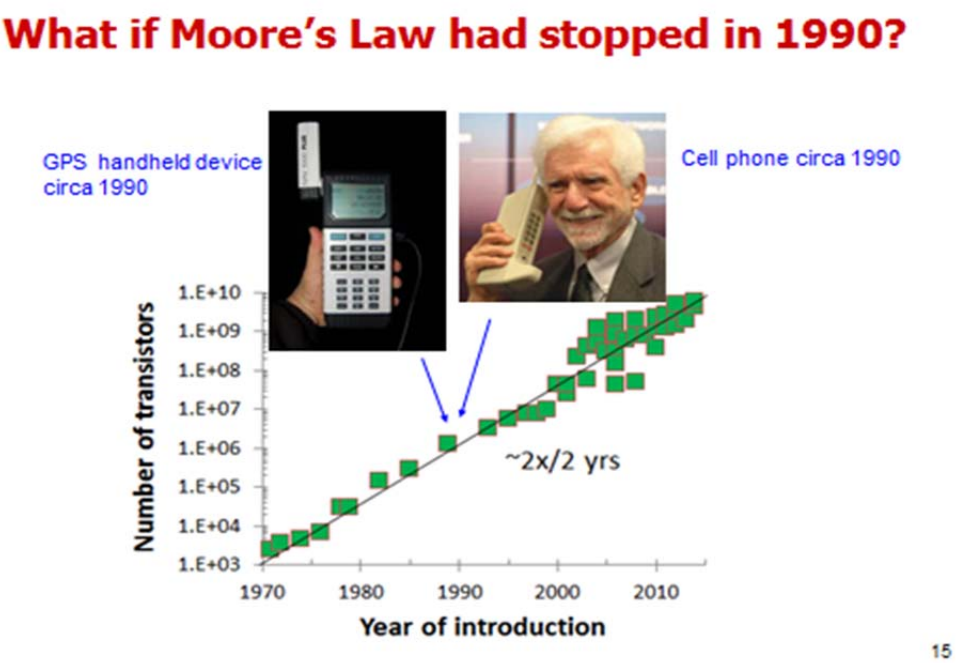
El primer microprocesador de Intel, el 4004, fue lanzado en 1971. Tenía 2250 transistores. Se muestra aquí.

En 2014 Intel fabricó el *Xeon Haswell-E5* con 5.6 mil millones de transistores. Aquí está la imagen.





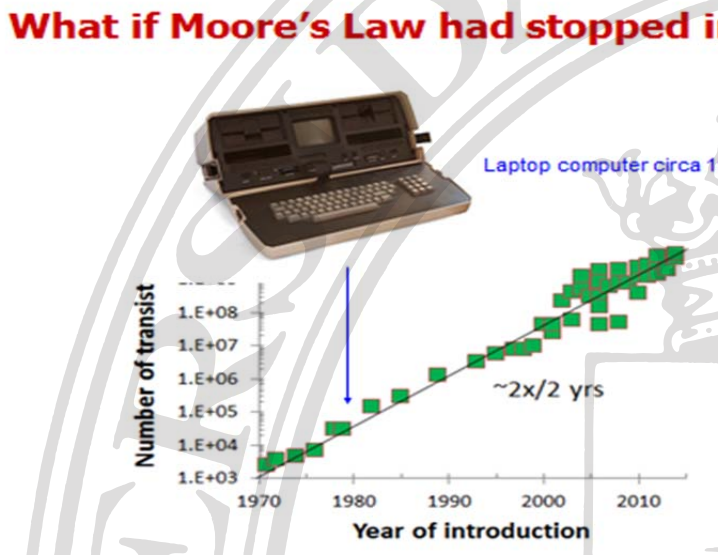
Tras 50 años de la Ley de Moore no hay, virtualmente hablando, campo alguno que no haya sido transformado gracias al progreso de la electrónica. Esto incluye transporte, información, energía, medicina, industria y, por supuesto, el entretenimiento.



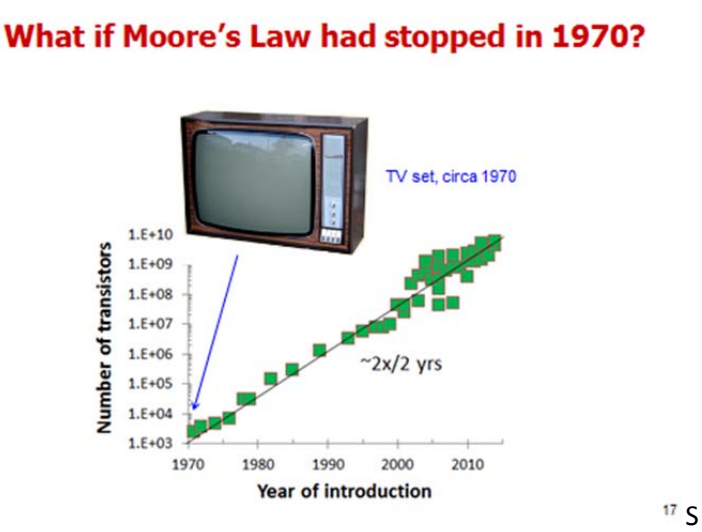
Es fácil dar por sentada la Ley de Moore pero para entender lo que realmente ha significado para la Humanidad, tan solo tenemos que mirar un poco hacia atrás.

Si la ley de Moore hubiera llegado a su fin en 1990, así sería su teléfono móvil. Pesaría casi 1 kg y desde luego no cabría en su bolsillo.

Con la ley de Moore parada el mismo año, el receptor de GPS seria así.

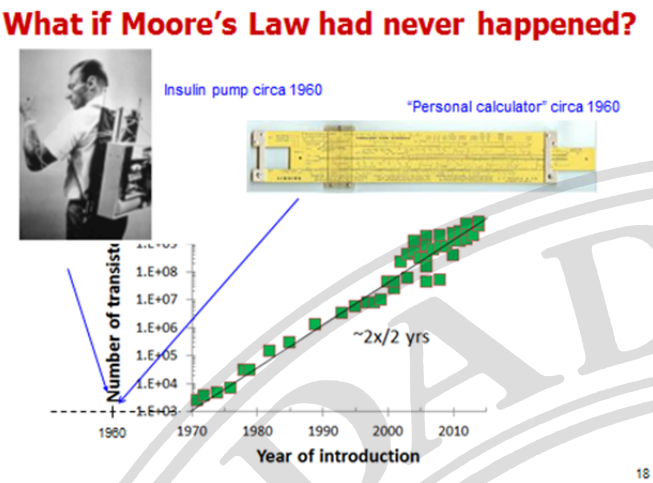


Si la Ley de Moore se hubiese acabado en 1981, esta sería la apariencia de su ordenador portátil.

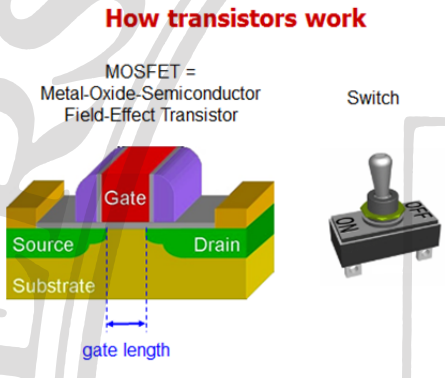


S

Si la Ley de Moore se hubiera acabado en 1970, así sería su televisor.



Y si la ley de Moore nunca hubiera tenido lugar, así sería su bomba de insulina y esta sería su calculadora personal.

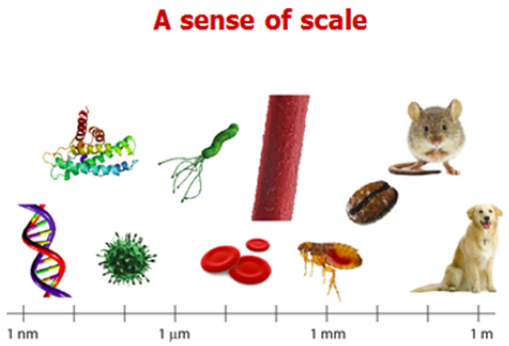


Detengámonos un momento en ver la estructura de un transistor y su funcionamiento. El transistor responsable de la revolución microelectrónica tiene un nombre largo. Se llama transistor de efecto de campo metal-oxido-semiconductor, o MOSFET.

Aquí está el esquema de la sección transversal de un MOSFET. Consta de tres electrodos: dos en el interior del semiconductor, fuente y drenador, y un tercero justo encima y a caballo de los otros dos que recibe el nombre de puerta.

El MOSFET se comporta principalmente como un interruptor que puede estar abierto o cerrado. Cuando el interruptor está abierto, la conexión eléctrica entre fuente y drenador está rota y no pasa corriente. Cuando está cerrado se establece un camino conductor entre la fuente y el drenador y la corriente puede fluir. El camino conductor es creado por una capa de electrones que se inducen en la superficie del semiconductor por la acción del efecto de campo de la puerta.

La dimensión más importante de un MOSFET es la longitud de puerta. En esencia, ésta es la distancia que separa a la fuente del drenador. Este parámetro controla las propiedades eléctricas más importantes del transistor y hay que controlarlo con gran precisión.

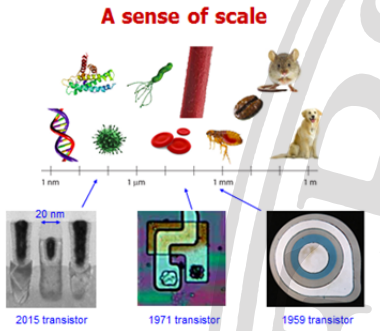


Este es un buen momento para hacerse una idea general de la escala de longitudes que son apropiadas aquí. La escala que se presenta en esta transparencia va de un 1 m a un 1 nm en factores de diez, 9 décadas en total.

En el rango de un metro de longitud tenemos a un perro. Alrededor de los 10 cm tenemos a un ratón. En el nivel de 1 cm, tenemos un grano de café. A 1 mm, una pulga.

Un pelo humano tiene un diámetro de unas 100 micras. Un glóbulo rojo tiene un tamaño de 10 micras aproximadamente y una bacteria alrededor de una micra.

Los virus tiene un tamaño entorno a los 100 nanómetros y las proteínas están en el rango de los 10 nm. La separación entre dos cadenas de ADN es del orden de 1-2 nm



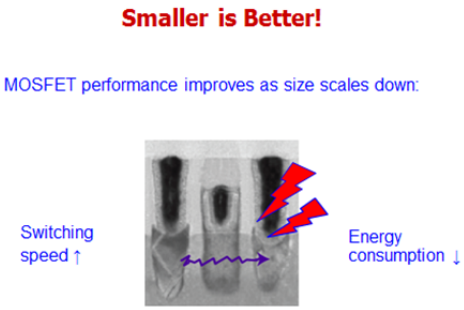
¿Cuál es la escala de un transistor?

Aquí lo ven.

Los primeros transistores tenían un tamaño que se aproximaba a 1 mm.

Para 1971 la tecnología que se usó en el primer microprocesador de Intel, los transistores tenían un tamaño del orden de 50 micras, similar a las dimensiones de una célula.

Así avanzamos hasta el 2015. En los transistores más avanzados, la dimensión critica de la puerta es alrededor de los 20 nanómetros, el tamaño de una cadena proteica. El transistor completo es del tamaño de un virus.



Disminuir el tamaño de los transistores es el camino obvio para integrar un número mayor de ellos en un solo chip. Esto da lugar a chips que pueden ejecutar operaciones más complejas y a sistemas que son más inteligentes.

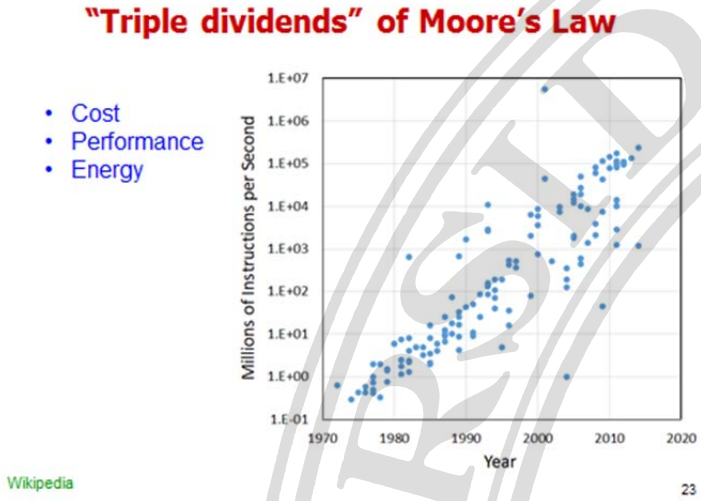
Un hecho sorprendente sobre los MOSFETs es que sus prestaciones mejoran a medida que su tamaño va siendo reducido. Eso es algo verdaderamente singular y sin lo cual no habría Ley de Moore.

22

Esto sucede de dos maneras. A medida que el tamaño de los transistores se reduce, la distancia que los electrones necesitan recorrer de la fuente al drenador se acorta. De esta manera los transistores se encienden y apagan más rápidamente y por consiguiente tenemos circuitos más rápidos.

Además, cuando reducimos su tamaño, el voltaje al que los transistores pueden operar también se reduce. Esto es crucial puesto que implica que la energía que se disipa en el transistor es reducida a su vez. Si no fuera así, los microchips se calentarían demasiado y la densidad de transistores tocaría un límite.

El hecho que los transistores mejoren a medida que empequeñecen es verdaderamente un milagro de la microelectrónica. No hay muchos otros sistemas que tengan esta propiedad tan increíble. Esto es una de las razones fundamentales por la cual la Ley de Moore ha sostenido un progreso exponencial a lo largo de 50 años, algo que no se puede observar en otros campos.



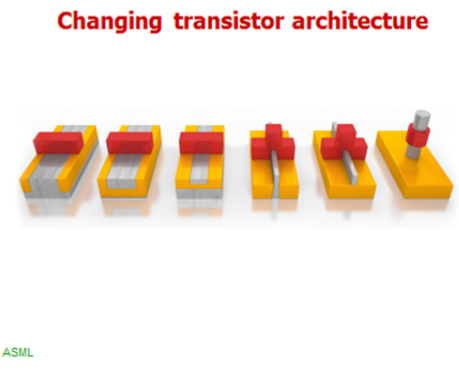
Para resumir, la ley de Moore se refiere al número de transistores integrados en un chip. Esto tiene una implicación inmediata en el coste del sistema que lógicamente se reduce.

Pero con la reducción del tamaño del transistor, como ya hemos visto, también vienen mejoras en las prestaciones del sistema y en su eficiencia energética. Podemos así hablar de dividendos triples de la Ley de Moore.

23

Las mejoras en las prestaciones de un sistema a lo largo de los años han sido asombrosas, como se puede apreciar en esta gráfica. Aquí se refleja el número de operaciones por segundo que un ordenador es capaz de realizar en función del año de introducción. La escala es una vez más semilogaritmica con lo cual el crecimiento es, una vez más, exponencial. Alrededor de 6 órdenes de magnitud en los últimos 50 años.

Hay otra observación fascinante que se puede hacer en esta gráfica. Fíjense en los puntos que se separan del resto. Éstos corresponden a supercomputadores: los mejores diseños, las máquinas más sofisticadas que usan la tecnología más avanzada con mínimas limitaciones. Miren cómo en 10-15 años los ordenadores convencionales alcanzan las mismas prestaciones que los supercomputadores. Un ordenador portátil hoy pone en nuestras manos el poder de calculo de un supercomputador de hace 10 años.



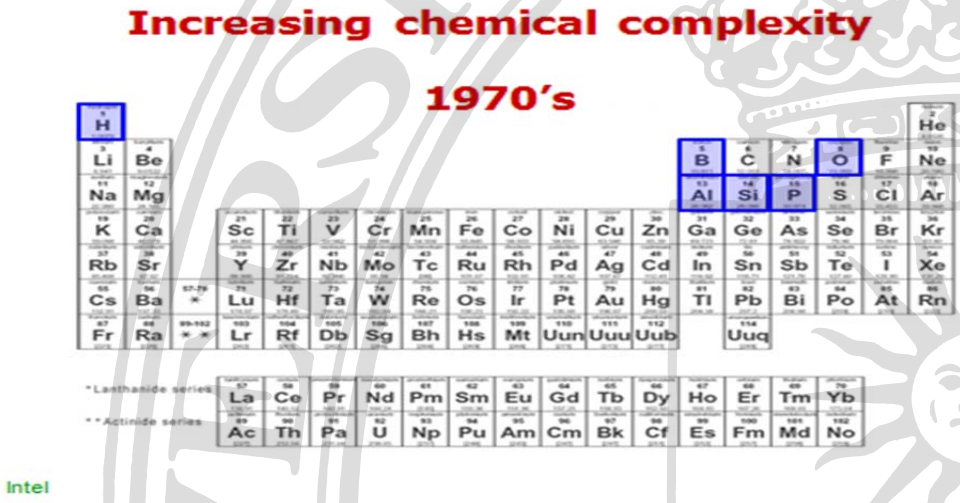
Esto gracias a la Ley de Moore.

Como se pueden imaginar, avanzar la Ley de Moore no ha sido "un camino de rosas". Ha supuesto un gran trabajo. A medida que pasa el tiempo los transistores se hacen más pequeños y dar el siguiente paso se vuelve cada vez más difícil.

Por diversas razones, la estructura de los transistores ha tenido que modificarse con el objeto de poder hacerlos más pequeños. Esta imagen muestra, de izquierda a derecha, el cambio en la arquitectura de los transistores que ha ocurrido debido a la necesidad de miniaturizarlos. En estos dibujos, el canal de conducción es inducido en la superficie de la zona gris, y la puerta que lo controla es el elemento rojo. Pueden ver cómo inicialmente, el transporte de electrones tiene lugar de fuente a drenador en la superficie del semiconductor. Con objeto de mejorar el control de la puerta sobre el canal, que es la clave para hacer transistores más pequeños, el semiconductor ha tenido que reducirse a una capa muy fina.

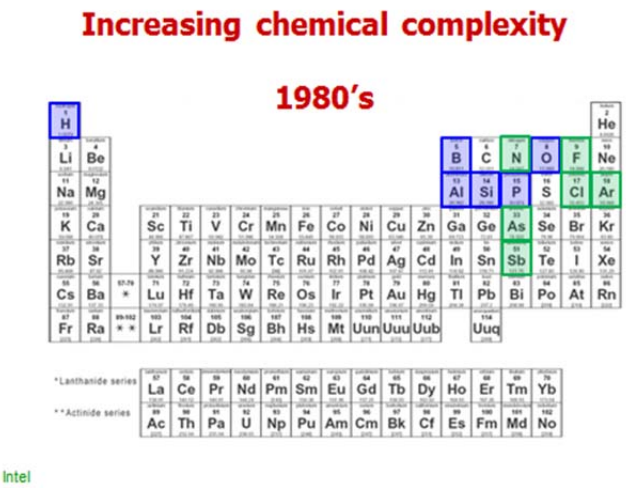
Con el tiempo, el transistor ha tenido que tomar una forma tridimensional con un canal que sobresale de la superficie del substrato como la aleta dorsal de un tiburón. Por eso, este tipo de transistor se le llama "FinFET". En el FinFET, la puerta envuelve al canal en tres lados. Esto es mucho más complicado de fabricar. Así son los transistores más avanzados hoy.

Mirando hacia el futuro, seguir reduciendo el tamaño del transistor empuja su diseño a su límite que es la forma de un fino tubo o 'nanohilo' vertical, con una puerta que lo rodea. Este es el diseño que presenta la mínima huella y ocupa el menor espacio. Fabricar estructuras tridimensionales de este tipo a nivel manométrico está convirtiéndose en una verdadera hazaña.



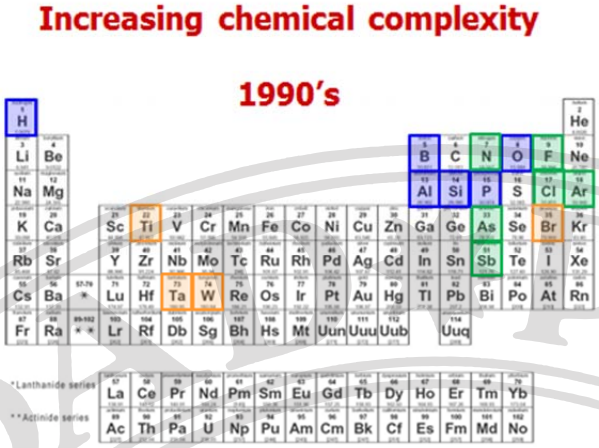
Una medida del aumento de la complejidad de la fabricación de circuitos integrados puede ser determinada por la creciente riqueza química de los microchips y de sus procesos de fabricación.

Los chips de los años 70 utilizaban alrededor de 6 elementos distintos de la tabla periódica. Silicio para el semiconductor, fósforo y boro como dopantes, oxígeno en el dióxido de silicio de la puerta, aluminio como contacto e hidrogeno para inactivar la superficie.

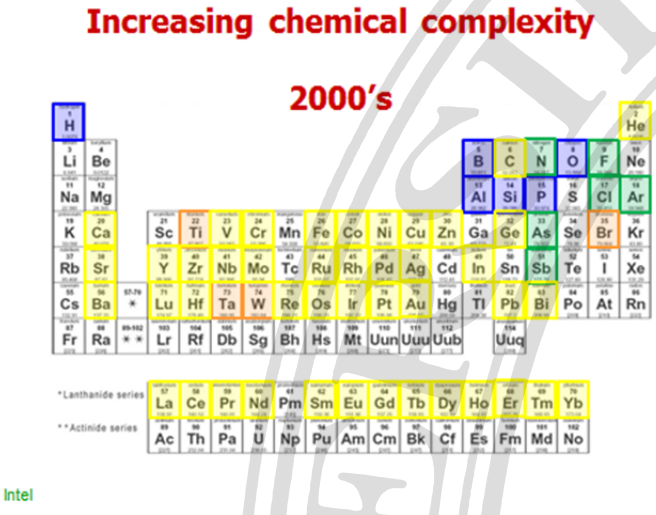


Con la reducción del tamaño de los transistores, las cosas se complicaron y fueron necesarios nuevos elementos y procesos químicos. Esta es la situación en los años 80.

Aquí están los 90. Se introdujeron más elementos.



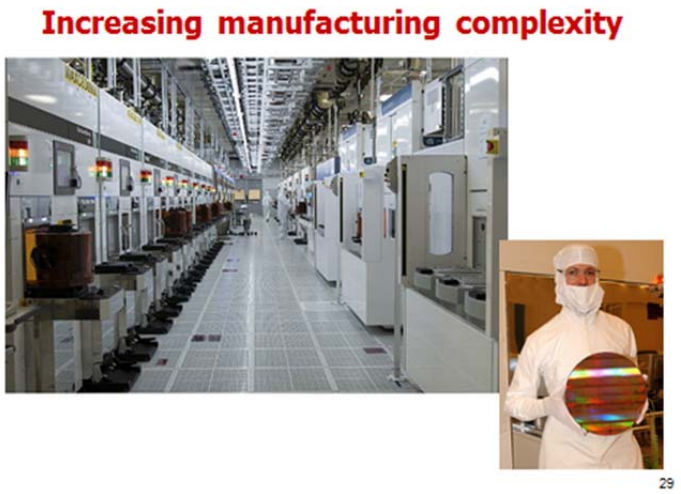
27



28

Y esta es la situación en los últimos años. Para poder realizar los diseños tan complejos de hoy, ha sido necesario introducir nuevos materiales: nuevos conductores, nuevos dieléctricos, nuevos materiales de interfaz, etc.

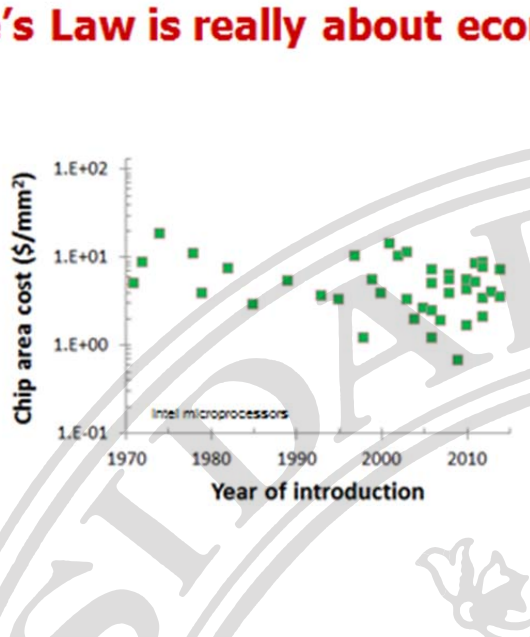
En el futuro, esta riqueza química no va a dejar de complicarse



Uno se da una buena idea de la complejidad de la nanoelectrónica moderna visitando una de las fábricas.

Las fábricas de semiconductores actuales son edificios gigantescos, que alcanzan fácilmente el tamaño de un campo de futbol. También cuestan una gran cantidad de dinero. Las más avanzadas pueden costar hasta 10 mil millones de dólares. Esto se debe a que las máquinas son cada vez más caras. Algunos instrumentos hoy cuestan por encima de los 100 millones de dólares cada uno.

Las obleas de silicio, las cuales son la base en la que los microchips se fabrican, tienen hoy un diámetro de 30 cm. En un futuro cercano se procesaran obleas de 45 cm de diámetro. El equipamiento requerido para fabricarlas será enorme y muy costoso.



Si pensamos en ello, en esencia, la ley de Moore es una ley que pertenece al campo de la economía.

Uno de los logros más impresionantes de la industria de semiconductores es que a lo largo de los años ha podido mantener el coste del área del chip constante. Eso incluso cuando los transistores se hacían más pequeños y complejos y su número aumentaba de forma exponencial. Podemos ver esto aquí, para el caso de los microprocesadores de Intel. Esta grafica enseña el coste por unidad de área de los microprocesadores de Intel a lo largo de su historia. Como se muestra aquí, durante 45 años el coste se ha mantenido aproximadamente constante entre 1 y 10 dólares por **mm^2**

Y esta es la clave de la Ley de Moore. Manteniendo los costes de generación en generación constantes crea el ímpetu, el incentivo para seguir innovando. Porque con la siguiente generación de tecnología, un sistema en particular ocupara menos superficie y como consecuencia será más barato.

Si fallásemos en esta corrección, el final de la Ley de Moore llegaría rápidamente. El día en que la siguiente generación tecnológica sea más cara que la anterior, la motivación para innovar desaparecerá.

Hay señales de que esto parece que está a punto de suceder. Y esta es la preocupación que se expresa estos días sobre la Ley de Moore.

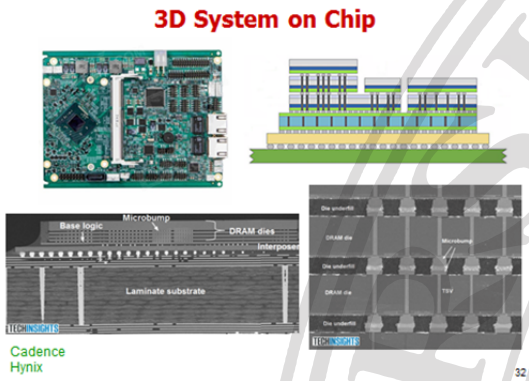
Ahora, para aclarar, esta no es la primera vez que se han hecho tales predicciones. Numerosas veces en el pasado, han surgido otros presuntos límites y el progreso se vio amenazado. Con innovación, creatividad y trabajo duro, la industria, apoyada por la investigación universitaria, superó todos los obstáculos y el progreso ha continuado imbatido.

Pero ahora estamos en una encrucijada nueva. Esta vez, lo que amenaza la Ley de Moore no es la física sino la economía. Es un reto nuevo.

31

Entonces nos debemos preguntar: ¿Qué sucede si la Ley de Moore se ralentizase o incluso se parase? ¿Significa esto el fin de este increíble viaje?.

Yo, de hecho, no lo creo. Voy a darles dos ejemplos de dos caminos que sugieren la posibilidad de un rápido progreso continuado en lo que realmente nos interesa que es la mejora de las prestaciones a nivel de sistema a precio razonable. Lo que generalmente nos preocupa como consumidores no es el número de transistores que tienen los circuitos integrados en nuestro teléfono. Lo que cuenta es el servicio que nos presta, cuánto cuesta y si está a la moda.



32

Si miran un sistema moderno, como el de esta imagen, pueden ver que está compuesto de una placa sobre la que están montados muchos microchips y otros componentes unos al lado de los otros. El tamaño del sistema es relativamente grande y la gran separación entre componentes limita su respuesta, como es el caso de la velocidad y el consumo de potencia.

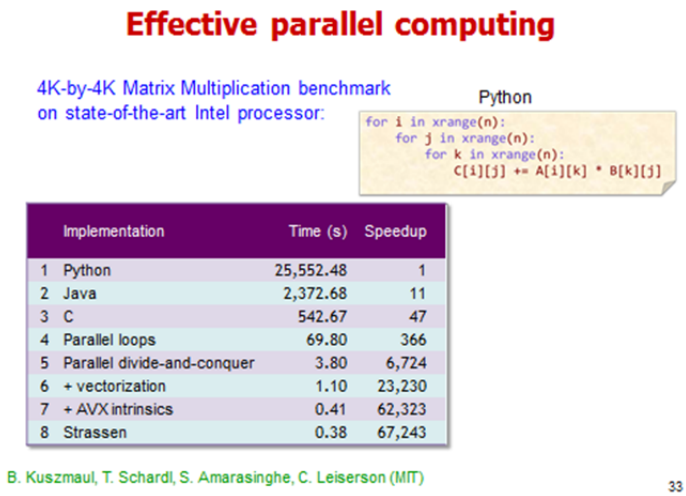
Se pueden conseguir grandes mejoras en las prestaciones del sistema si los microchips se adelgazan y apilan unos encima de los otros, como se ve en este esquema. Para permitir la conexión entre chips, se crean vías de conducción verticales a través de ellos, las cuales terminan en micro-protuberancias que las conectan entre si. De esta manera, las distancias que las señales tiene que recorrer se reducen enormemente así como los elementos parásitos de las interconexiones. Esto se traduce en mejoras significativas en velocidad, consumo y, por supuesto, en el peso y la dimensión del sistema.

Esta tecnología es conocida con "sistema en chip 3D". 3D porque los chips están apilados unos sobre otros en la tercera dimensión.

Aquí observamos algunas imágenes de un prototipo de memorias 3D de *Hynix*. Como pueden apreciar, hay cuatro niveles de memoria sobre un chip lógico. También se puede ver las vías recorriendo los chips e interconectándolos a través de las microprotuberancias.

Esta tecnología de sistema en chip 3D ofrece un gran potencial para la mejora del rendimiento de sistemas incluso si la tecnología de transistores de los chips no se modifica.

Lo que acabo de explicar es un método basado en hardware para llevar el comportamiento de un sistema más allá incluso si la Ley de Moore se ralentiza. También podemos explotar el software.



Una consecuencia de avanzar tan rápidamente con la Ley de Moore es que los diseñadores de software han carecido de incentivo para diseñar programas que sean eficientes. Esto se debe al hecho de que el diseño y optimización de un programa requiere una gran cantidad de tiempo y como consecuencia es altamente costoso. Para cuando el software estuviese listo, el progreso en la Ley de Moore habría proporcionado un beneficio equivalente sin haber tenido ningún gasto de desarrollo de software. Es decir, era más sencillo y barato dejar el software intacto y esperar a la siguiente generación de hardware.

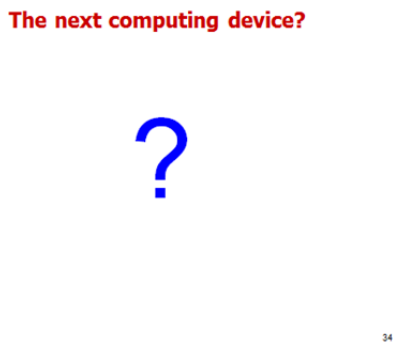
Con la ralentización de la Ley de Moore o, en el peor de los casos, su final, los diseñadores de software tendrán incentivos para usar sus destrezas para mejorar las prestaciones del sistema aunque el hardware no cambie.

Aquí les presento un ejemplo que ilustra el enorme potencial de este enfoque. Este ejemplo viene de la investigación de varios colegas del MIT. Estudiaron el tiempo de cálculo requerido para multiplicar dos matrices de 4000 por 4000 elementos utilizando un microprocesador del estado de arte. Esta operación la realizaron en diferentes lenguajes de programación. El estándar es *Python,* bastante común estos días. Con *Python*, esta operación, que parece tan sencilla, requiere más de 25,000 segundos o 7 horas.

En esta tabla pueden ver el aumento de la velocidad de cálculo que se puede conseguir si se usan otros lenguajes o técnicas de programación. Por ejemplo, con *Java* el tiempo de ejecución es reducido a un poco más de 2000 segundos o un factor de aceleración de 10. Con *C* la aceleración es casi de un factor de casi 50.

Usando técnicas de programación que explotan paralelismo, la aceleración del sistema puede ser enorme. Utilizando las técnicas de paralelismo más avanzadas, este grupo ha demostrado que se puede acelerar este mismo cálculo en un factor de más de 60,000. Es decir, pasamos de más de 7 horas de ejecución en *Python* a tiempos por debajo de 1 segundo si se optimiza las técnicas de programación empleadas. Para mí, este es un gran ejemplo del progreso en computación que se puede alcanzar en tan solo el campo del software.

Es por ello por lo que estoy muy convencido de que incluso si la tasa de progreso en la cantidad de transistores que podemos integrar se ralentizase, sería razonable seguir esperando progreso en la respuesta de los sistemas durante un largo tiempo.



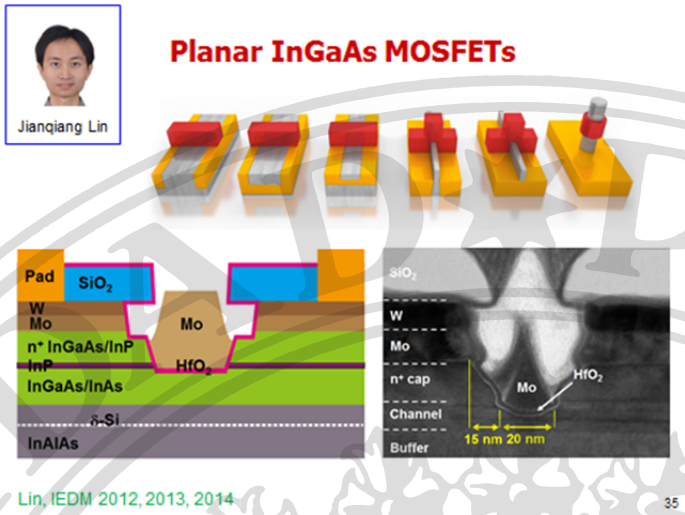
Lo que yo espero es que estas técnicas que acabo de describir y otras parecidas nos ayuden a solventar el vacío que nos dejaría el fin de la Ley de Moore.

Yo espero que estas técnicas nos den un poco de tiempo para poder inventar o descubrir un nuevo paradigma para la computación que no esté basado en transistores semiconductores actuando como interruptores sino en nuevos dispositivos electrónicos probablemente basados en materiales nuevos y principios físicos nuevos.

En ese sentido, este es un momento estupendo para ser ingeniero o científico especialista en la electrónica del estado sólido. Por primera vez en 50 años, tenemos la oportunidad de inventar el dispositivo electrónico que pueda hacer despegar una nueva revolución electrónica.

No quiero terminar esta presentación sin darles una idea de la investigación que estamos realizando en este campo en mi grupo en el MIT.

Una manera de empujar a la Ley de Moore hacia adelante es la de usar materiales con mejores propiedades que el silicio. Utilizando materiales donde los electrones viajan más rápido que en el silicio, podemos reducir el tamaño del transistor y el voltaje de operación mientras mantenemos el buen comportamiento del transistor. En última instancia, esto permite una mayor densidad de transistores.

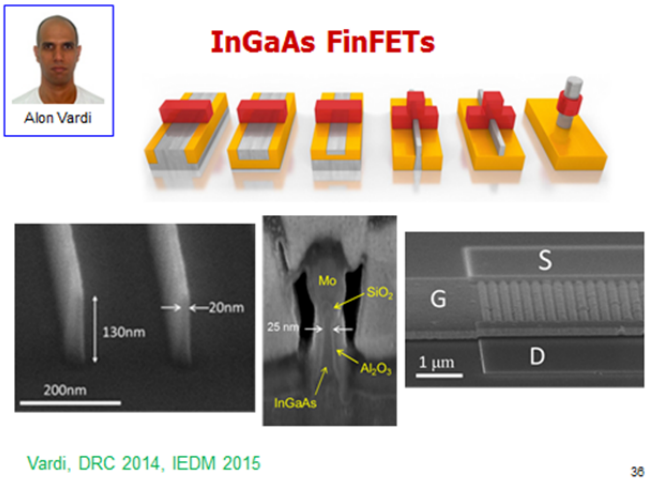


Un material que estamos investigando en mi grupo es InGaAs. Este es un compuesto semiconductor ternario, lo cual lo hace más complejo que el silicio. La ventaja del InGaAs es que los electrones viajan hasta tres veces más rápido que en silicio. En mi grupo, estamos investigando transistores basados en InGaAs con diseños diferentes.

Aquí está el trabajo de mi estudiante Jianqiang Lin. Él ha desarrollado MOSFETs planares de InGaAs de este tipo. Como pueden ver en la siguiente figura, son estructuras complejas que involucran muchos materiales distintos y técnicas de fabricación muy precisas realizadas a escala nanométrica.

Pueden ver aquí la sección transversal del transistor más pequeño que Jianqiang ha logrado fabricar y que además funciona. La longitud de puerta es de unos 20 nm (del tamaño de una proteína , si recuerdan) y los contactos de fuente y drenador están separados de la puerta por tan solo 15 nm.

En este momento, con estos transistores, Jianquiang tiene el record mundial de la mejor respuesta de los MOSFETs de InGaAs.



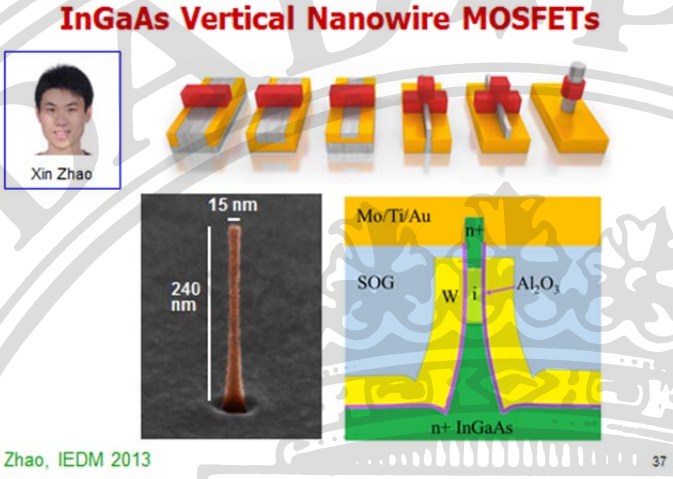
También estamos investigando InGaAs FinFETs. Si recuerdan, estos son transistores de este tipo en el que el canal de conducción sobresale de la superficie de la oblea como la aleta dorsal de un tiburón. La puerta que controla el flujo de electrones envuelve al canal por tres lados. Esto permite hacer transistores muy pequeños con buenas prestaciones. Para que esta idea funcione bien, el *fin* debe ser extremadamente estrecho.

Para poder realizar estos transistores en nuestro grupo con InGaAs, hemos desarrollado una tecnología de ataque que nos da *fins* muy estrechos y con paredes muy verticales. Aquí ven *fins* de 20 nm de espesor y 130 nm de altura. Nuestro record es 5 nm de espesor. Creemos que esto es también un record mundial.

Con estos *fins*, mi becario posdoctoral Alon Vardi ha fabricado InGaAs FinFETs. En la imagen anterior puede verse una sección transversal de uno de ellos con un *fin* de 25 nm de espesor. Esta es una vista en perspectiva que muestra muchos *fins* en paralelo entre la fuente y el drenador con la puerta por encima de todos ellos.

También estamos estudiando MOSFETs de nanohilos verticales de InGaAs. Son dispositivos de este tipo. Este es el transistor con el mejor potencial de miniaturización. En este caso, el transistor se coloca de canto y la corriente fluye vertical a la superficie. Esto permite una huella muy pequeña.

Mi becario Xin Zhao ha desarrollado una tecnología de ataque para fabricar nanohilos delgadísimos, como pueden ver aquí. Su record es un diámetro de 15 nm y una altura de 240 nm. Este es un resultado del que estamos muy orgullosos.



Besándose en estos nanohilos , Xin ha desarrollado un proceso de fabricación de transistores en el que la corriente fluye verticalmente. Esta es la fuente, está la puerta envolviendo el nanohilo y aquí está el drenador. Es muy posible que en un futuro no muy lejano sean transistores de este tipo los que encontremos en todo tipo de sistemas.

Acabo esta charla con esta foto de mi grupo de investigación en MIT tomada hace unas semanas en mi casa. Al igual que yo, mis becarios investigadores están increíblemente orgullosos de los logros de la nanoelectrónica. Se esfuerzan en contribuir al futuro progreso de la nanoelectrónica para el servicio de la Humanidad.

Muchas gracias por su interés.