

¿Hemos llegado al límite de miniaturización de los dispositivos electrónicos?

Por Adriana Pliego

La era del circuito integrado

En 1958 la pequeña empresa National Instruments de Estados Unidos contrató al ingeniero eléctrico Jack Kilby de 35 años. Su trabajo consistía en miniaturizar componentes electrónicos. Con el satélite ruso *Sputnik* circulando la órbita terrestre surgió la presión en EUA de desarrollar tecnología que pudiera llevarse al espacio. Esto implicaba además una reducción del tamaño de los componentes electrónicos, pues a menor masa menor energía invertida en escapar de la fuerza de gravedad con una nave espacial. Según cuenta el propio Kilby, el verano de su contratación por no tener derecho a vacaciones, se quedó trabajando en el diseño de un circuito único con todas las funciones de una gran cantidad de componentes soldados a mano, un resistor que transfiriera cargas según la corriente inyectada. La solución fue lo que hoy conocemos como transistor, y que es ahora parte de los llamados circuitos integrados o chips. Este circuito estaba construido sobre un

material semiconductor, que se comporta como aislante eléctrico hasta que se le aplica energía en forma de voltaje o calor. El circuito integrado de Kilby se construyó sobre germanio, un material semiconductor descubierto en Alemania, que se encuentra en pequeñas cantidades en minas de plata y otros metales. Casi simultáneamente, el ingeniero Robert Norton Noyce de 30 años, descubrió lo mismo que Kilby en la empresa llamada actualmente Fairchild Semiconductor, de la cual fue cofundador, pero él utilizó un material semiconductor más barato y abundante, el silicio. El transistor se compone de tres partes: compuerta (gate), drenaje (drain) y fuente (source). Un flujo de electrones se desplazará de la fuente al drenaje como respuesta proporcional a la carga aplicada en la compuerta de entrada (figura 1).

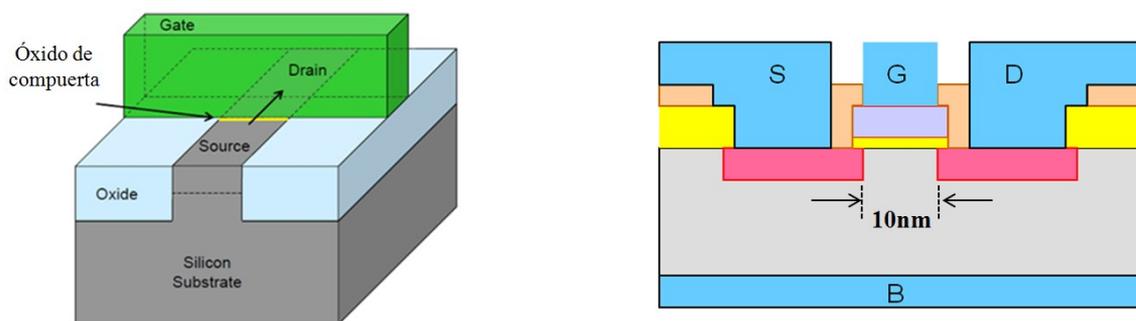


Figura 1. Esquema de los tres componentes de un transistor: en tres (derecha) y dos (izquierda) dimensiones del transistor MOS (Metal-Oxide-Semiconductor, por sus siglas en inglés), donde S= fuente (source), D= drenaje o drenador (drain), G= compuerta (gate), B= cuerpo de silicio (bulk). La distancia física que separa la fuente del drenador es actualmente de 10 nm (aproximadamente 18 átomos de silicio).

Ambos ingenieros recibieron en el año 2000 el premio Nobel de física por “su participación en la invención del circuito integrado”. Kilby recibió el premio en representación de ambos pues Noyce había fallecido 10 años antes. Al ser notificado sobre el premio Kilby manifestó que consideraba improbable resultar ganador, pues en el momento de su invención no era claro cuál sería la aplicación del circuito integrado (figura 2).

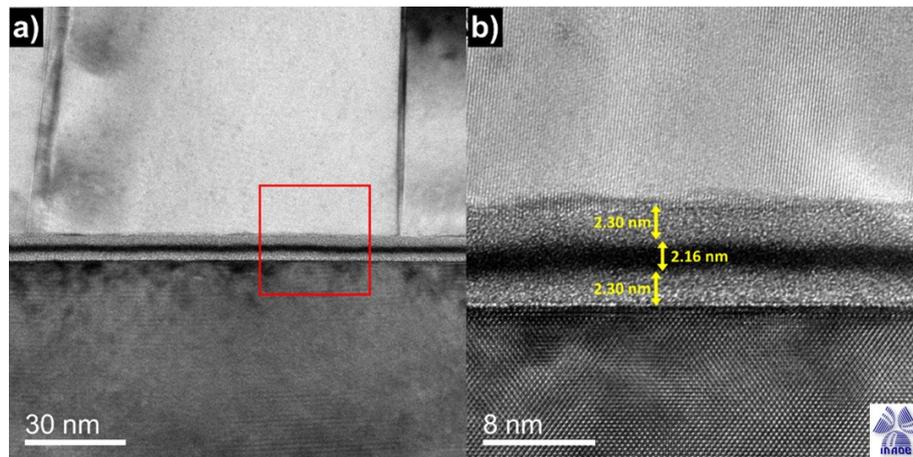


Figura 2. Corazón de un transistor. Imágenes de microscopía electrónica de transmisión del núcleo de un transistor avanzado cuyos óxidos de compuerta se depositan sobre un sustrato de silicio cristalino con un control a nivel atómico de los espesores, la composición química y otras propiedades físicas generales. En la imagen (b), cada punto del material inferior es un átomo individual de silicio (1 átomo de silicio= 0.24nm de diámetro).

A pesar del escepticismo de Kilby ante su invención, el transistor ha hecho posible el desarrollo de todos los dispositivos electrónicos que se utilizan hoy en día, desde la computadora personal hasta los dispositivos móviles. Estos pequeños componentes son los responsables de la gran revolución electrónica de la cual somos testigos.

Aunque el descubrimiento de las propiedades de los materiales semiconductores fue fundamental para el inicio del periodo que se conoce como revolución digital, fue igual de importante el esfuerzo de las empresas de miniaturizar los circuitos integrados. Esta reducción en las dimensiones de los transistores fue tan constante año con año que Gordon Moore, quien en 1968 fundaría junto con Noyce la empresa que hoy conocemos como Intel Corporation, se atrevió a predecir que la reducción obedecería una ley bautizada como la ley de Moore.

La predicción que se convirtió en ley

¿Has escuchado que un iPhone tiene más capacidad de cómputo que todo el programa Apolo que llevó al hombre a la Luna en 1969? ¿Cómo puede ser eso

posible? Desde la invención del transistor de silicio comenzó una carrera para encontrar nuevas aplicaciones que pudieran beneficiarse de su uso y disminuir su tamaño cada año. Desde 1965 Intel y otras empresas fabricantes de microchips han intentado cumplir con lo señalado por el Dr. Moore, quien al ser entrevistado por la revista *Electronics Magazine* afirmó que el número de transistores dentro de un circuito integrado se duplicaría en tan sólo un año. Esto quiere decir que si un circuito integrado contenía 10 transistores en cierto año, al año siguiente habría 20 en la misma superficie, 40 al tercer año. Las empresas fabricantes tomaron esta predicción como meta para miniaturizar sus nuevos desarrollos en poco tiempo. Esta forma de trabajo bautizada como ley de Moore, fue efectiva y se cumplió durante diez años. Después de 1975 el periodo de miniaturización se extendió a dos años. Desde entonces hasta nuestros días esta predicción se ha mantenido en 18 meses (figura 3).

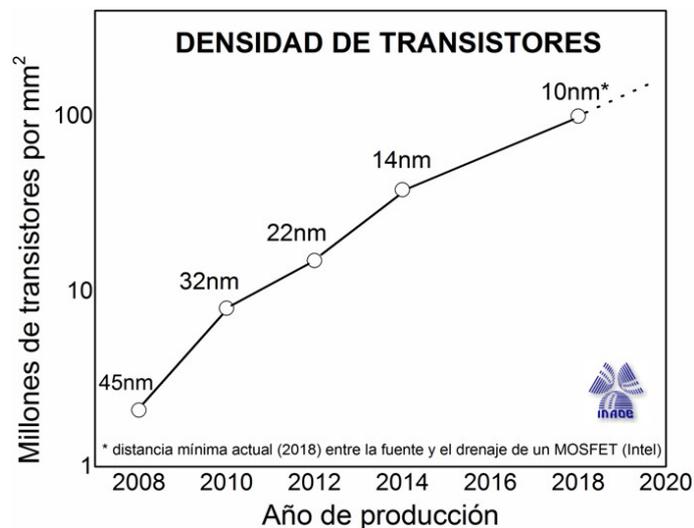


Figura 3. Densidad de los transistores tipo MOSFET que actualmente caben en un área de 1 mm². En 2010 cabían en ella 10 millones de transistores de 32 nm, hoy (2018) caben 100 millones de transistores. Fuente: Intel, 2017 Technology and Manufacturing Day (estimaciones para el periodo 2017-2020).

Ahora un circuito integrado puede albergar más de un millón de transistores. Además el periodo de 18 meses coincide con el aumento en la velocidad de

desempeño del transistor, la cual consiste en qué tan rápido puede cambiar de un estado de “encendido”, el cual corresponde al “1” del sistema binario, a uno de “apagado” o “0” binario. Esta tendencia a empaquetar más transistores en menos espacio y la mejora en su eficiencia han permitido diseñar y fabricar teléfonos inteligentes, súper computadoras y vehículos autónomos.

Sin embargo los expertos han hecho una nueva predicción: la ley de Moore dejará de ser efectiva en el año 2020. ¿En qué se basan para hacer esta tajante afirmación? ¿Cómo han cambiado los transistores desde la década de los setentas para cumplir con las exigencias de la ley de Moore?

El grano de arena que conduce corriente

Después del oxígeno el silicio es el segundo elemento más abundante de la Tierra. Seguro que lo has visto en muchas formas pues es de lo que están hechos el vidrio, las cerámicas, las celdas solares, los lentes de contacto y otras muchas cosas de tu vida cotidiana. La arena, el cemento, los ladrillos y el barro son silicio. Para fabricar los transistores una de las formas más puras del silicio se procesa en forma de lingotes para después cortarse en rebanadas muy delgadas, conocidas como obleas. Sobre ellas se construyen los microcircuitos mediante técnicas parecidas a las de una imprenta. A esta técnica se le llama fotolitografía y consiste en grabar con luz ultravioleta la oblea de silicio, tratada previamente con materiales fotosensibles. Las obleas son de diferentes tamaños, llegando a ser de hasta 450 mm de diámetro. Cada una puede contener miles de millones de chips que posteriormente se cortan de manera individual para incorporarse a otros circuitos electrónicos (figura 4). Dado el delgado espesor de las obleas de silicio (0.5-1.0 mm), se considera que las impresiones de los chips generan componentes en dos dimensiones.

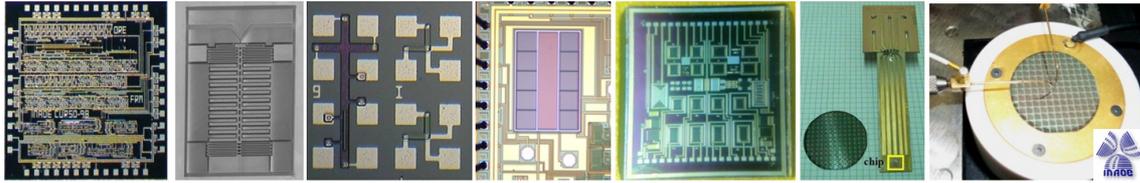


Figura 4. Circuitos integrados diseñados, fabricados y probados en INAOE (cada chip tiene dimensiones máximas de hasta 4mm por lado). De izquierda a derecha: circuito digital, interruptor de radio frecuencia, chip de pruebas de materiales semiconductores, FG-ISFET (transistor de efecto de campo sensible a iones, por sus siglas en inglés), sensores de iones ISCAP, oblea de silicio ya terminada (cada cuadro es un chip individual), oblea de silicio durante pruebas eléctricas sencillas.

Con el fin de ahorrar espacio al construir los transistores, desde los años noventas se utilizan procesos químicos que definen capas metálicas adicionales que sirven como conexiones. Actualmente Intel y otras compañías fabrican transistores cuyas dimensiones de compuerta son de tan sólo 10nm, lo que representa unos 18 átomos individuales conectados por medio de enlaces covalentes silicio-silicio. ¿Puedes imaginar un milímetro? pues un nanómetro es un millón de veces más pequeño que un milímetro ($1\text{nm} = 1\text{mm}/1,000,000$). Los expertos declararon en 2006 que el transistor de compuerta de 3 nm desarrollado por KAIST (Instituto Coreano Avanzado de Ciencia y Tecnología, Corea del Sur) había alcanzado el límite de lo pequeño y que con esto finalizaría la era de la ley de Moore. Pero aunque se han desarrollado compuertas de 7 átomos de longitud (aproximadamente de 4 nanómetros considerando los enlaces covalentes Si-Si), éstos aún no tienen aplicaciones comerciales ni están a la venta. Este también es el caso del transistor más pequeño reportado, el cual puede mover un solo electrón de la fuente al drenaje después de aplicar un potencial en la compuerta (figura 5).

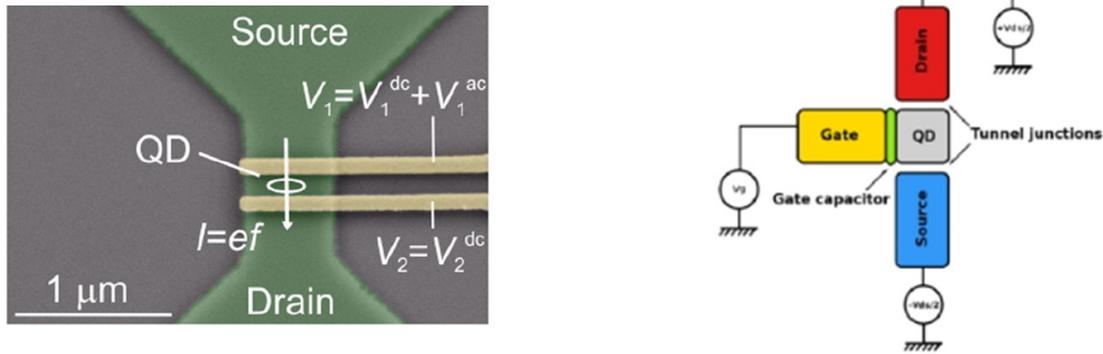


Figura 5. Izquierda: imagen de microscopía electrónica de barrido de la superficie de un dispositivo SET (single-electron transistor) que permite el transporte de 1 electrón individual por medio de un punto cuántico (quantum-dot) localizado entre fuente y drenaje. Derecha: esquema de la polarización asociada a un dispositivo SET. Fuente: F Stein et al, Metrologia, Vol. 54 S1 (2017).

¿Cuál es el siguiente paso en la frontera de lo pequeño?

Buscando que la ley de Moore continúe vigente, los fabricantes de microchips han ideado novedosas estrategias para continuar encogiendo componentes electrónicos. Una de ellas consiste en grabar los transistores no únicamente sobre la superficie de la oblea de silicio, sino aprovechar la altura en un espacio tridimensional. De hecho los transistores que usamos actualmente en nuestros equipos electrónicos recientes están fabricados en tres dimensiones y basados en tres secciones de compuerta, de tal forma que la sección que conecta a la fuente con un drenaje forma algo parecido a una delgada aleta en 3 dimensiones (FinFET significa transistor de efecto de campo de aleta en inglés); éstos consumen menos energía y permiten mayor velocidad de procesamiento que los transistores “planares” (figura 6).

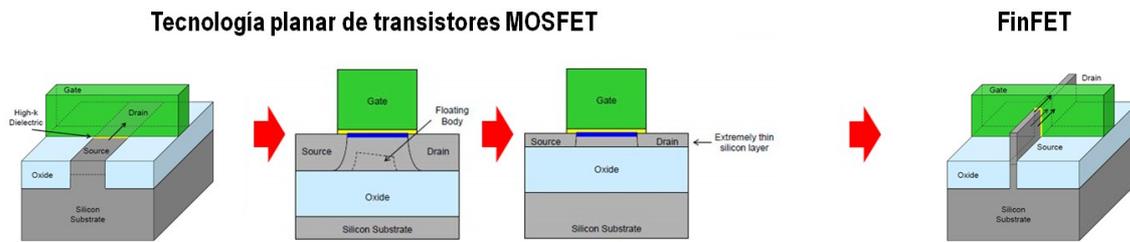


Figura 6. Evolución de la tecnología planar de transistores MOS a una en 3 dimensiones (FinFET).

Otro tipo de transistores novedosos son los de efecto de túnel, producto de la nano electrónica. La principal dificultad al trabajar con ellos es que mientras más pequeños son es más incierto predecir su comportamiento. Al alcanzar dimensiones cuánticas propias de las partículas subatómicas, estos transistores explotan la influencia del espín del electrón en la conducción eléctrica. Recordemos que el espín es una propiedad intrínseca de las partículas subatómicas como la masa y la carga eléctrica. De ahí el nombre que recibe esta área de estudio, espintrónica (ver en *Cienciorama* [¿Biología cuántica?](#), [La espintrónica](#)). A pesar de los esfuerzos para continuar miniaturizando estos componentes se estima que la ley de Moore llegará a su límite en el 2020 (figura 7).



Figura 7. Interior de las salas de cuartos limpios clase 100 del Laboratorio de Nanoelectrónica de INAOE. La clase de un cuarto limpio indica el grado de limpieza del mismo, de tal forma que en un volumen de un pie cúbico (30cmX30cmX30cm) no deben existir más de 100 partículas de polvo mayores a 5 μm de diámetro. Las imágenes muestran equipos para la producción de mascarillas (útiles para la transferencia de patrones geométricos) de depósito de películas delgadas, implantación de iones y grabado por iones reactivos.

Segunda ley de Moore

Un factor igual de importante que el tamaño para el avance tecnológico de los chips, ha sido su costo de fabricación. Para establecer el precio de los dispositivos

electrónicos que utilizamos todos los días, como computadoras y celulares, se considera el área efectiva de silicio que consume 1 transistor por mm^2 ($\text{mm}^2/\text{transistor}$), así como el costo de fabricación por mm^2 de algún sistema electrónico particular como un procesador ($\$/\text{mm}^2$). Esta relación permite obtener el costo individual por transistor ($\$/\text{Transistor}$) tal como se observa en la figura 8 e indica que los costos por transistor pueden seguir reduciéndose de manera exponencial simplemente al usar tecnologías avanzadas que permiten disminuir la distancia entre fuente y drenaje desde 130 hasta 7 nm (¡aproximadamente 12 átomos de silicio!).

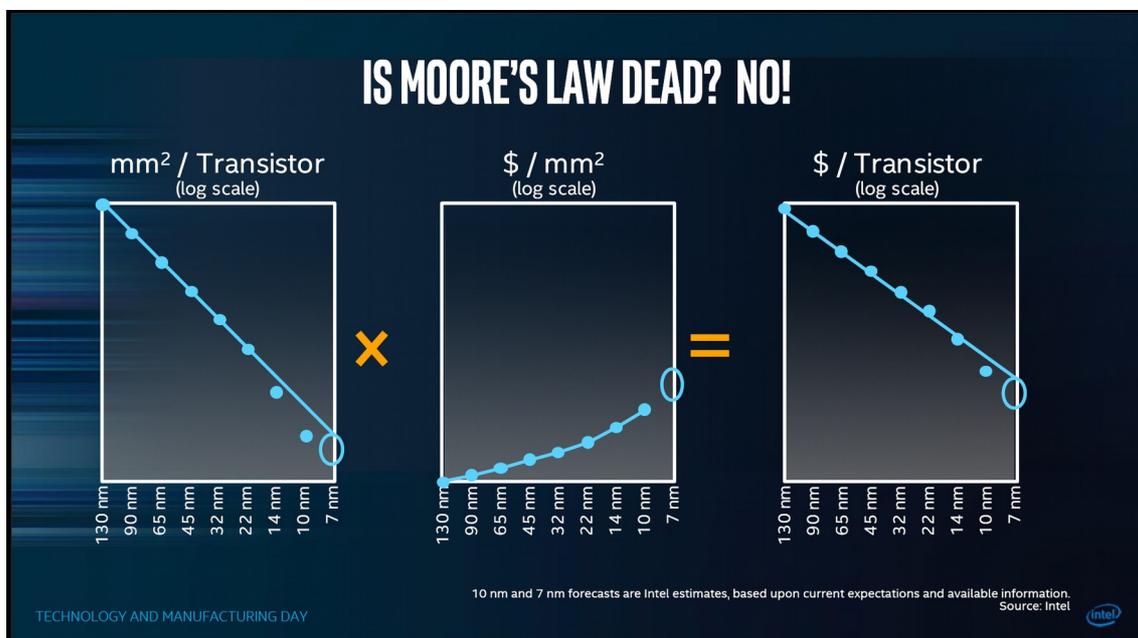


Figura 8. Título: ¿Ha muerto la ley de Moore? ¡No! De izquierda a derecha: dimensiones de un transistor que puede encontrarse en un mm^2 ; el costo de fabricación de transistores en un mm^2 se eleva conforme disminuye su tamaño; (el costo por transistor como unidad disminuye al disminuir su tamaño). Continuación de la ley de Moore. Fuente: Intel, 2017 Technology and Manufacturing Day (estimaciones basadas para el periodo 2017-2020).

No obstante, a pesar de que el costo individual de estos componentes disminuye en gran medida cada año, su costo de fabricación se duplica cada cuatro años. Esto ha mantenido el mercado de los semiconductores en un ciclo donde el capital recuperado por la tecnología vigente se invierte para implementar la siguiente

miniaturización. Sin embargo, así como la ley de Moore puede llegar a su fin al alcanzar dimensiones atómicas, la segunda ley de Moore o ley de Rock, enunciada por el gran inversionista de Silicon Valley (Valle de Silicio en California) Arthur Rock, podría frenar la ambiciosa tarea de concentrar transistores en espacios cada vez menores. El fin de ambas leyes, lejos de significar el fin de la micro y nano electrónica, abre la puerta a nuevos paradigmas de diseño de los componentes permitiendo que los desarrolladores se enfoquen no tanto en sus dimensiones sino en nuevos conceptos físicos, que posiblemente hoy sólo existen en la imaginación de sus futuros inventores, para aumentar su eficiencia mientras cumplen la misma función: servir como el interruptor más pequeño jamás creado por el ser humano.

Agradecimientos

Agradezco las valiosas aportaciones del Dr. Joel Molina Reyes, investigador titular del Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE) quien revisó el presente artículo y proporcionó fotografías e imágenes de su autoría para ilustrarlo. A excepción de las figuras 5 y 8, todas fueron tomadas a partir de dispositivos electrónicos desarrollados en los Laboratorios de Microelectrónica y de Nanoelectrónica de este respetable Instituto.

Imagen de entrada: oblea de silicio durante pruebas eléctricas sencillas

Referencias bibliográficas

Chang L., Choi Y-K, Kedzierski J, Lindert N, Xuan P, Bokor J, Hu C. y King T-J., “Moore’s Law Lives on Ultra-Thin Body SOI and FinFET CMOS Transistors Look to Continue Moore’s Law for Many Years to Come”, *IEEE Circuits & Devices Magazine*, pp. 35-42. (2003).

Fuechsle M., Miwa J. A., Mahapatra S., Ryu H., Lee S., Warschkow O., Hollenberg L. C. L., Klimeck G., Simmons M., “A single-atom transistor”, *Nature Nanotechnology*, 7, 242-246 (2012).

Ionescu A., Riel H., “Tunnel field-effect transistors as energy-efficient electronic switches”, *Nature* 479, 329-337 (2011).

Juin Jei Liou, Adelmo Ortiz-Conde, García-Sánchez Francisco, “Mosfet physics and modeling”, en *Analysis and Design of MOSFETs Modeling, Simulation, and Parameter Extraction*, capítulo 1, pp. 90-107.

Referencia electrónica

<https://www.technologyreview.com/s/600716/intel-chips-will-have-to-sacrifice-speed-gains-for-energy-savings/>

<http://www.wired.co.uk/article/wired-explains-moores-law>

<http://ieeexplore.ieee.org/document/7878957/figures?reload=true&part=1>

https://elpais.com/diario/2005/06/23/agenda/1119477606_850215.html

https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2000/

https://elpais.com/diario/1990/06/05/agenda/644536801_850215.html

<http://alef.mx/wp/jack-kilby-inventor-del-circuito-integrado-la-calculadora-portatil-la-impresora-termica-y-otras-60-patentes-2/>

<https://www.popularmechanics.com/space/moon-mars/a25655/nasa-computer-iphone-comparison/>

<https://www.theverge.com/circuitbreaker/2016/10/6/13187820/one-nanometer-transistor-berkeley-lab-moores-law>

<https://phys.org/news/2006-03-skorea-smallest-transistors.html>