



La Microelectrónica entre Semiconductores y Arreglos Moleculares

Alfred F.K. Zehe

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

azehe@prodigy.net.mx

En términos generales, la teoría para la respuesta de un material (por ej. el flujo de una corriente) a una perturbación externa (por el. a través de un voltaje aplicado) depende de la dimensionalidad del sistema y permite simplificaciones (la ley de Ohm en el ejemplo) solamente, cuando las tres escalas de longitud, definidas por el tamaño de la muestra, la distancia interatómica, y el camino libre medio del electrón o bien su longitud de onda DeBROGLIE en el cristal, pueden separarse por ordenes de magnitud. Un transistor con una extensión de $1 \mu\text{m}$ es **por cuatro ordenes de magnitud mas grande** que la separación lineal de los átomos ($\sim 0.2 \text{ nm}$), colocando en el **medio la longitud de onda** λ_{DB} (10 nm en silicio). En la misma lógica es correcto decir, que la teoría clásica debe sustituirse por una teoría cuántica tan pronto que tamaños característicos de la muestra llegan a ser comparables con dimensiones ondulatorias de los electrones.

Desde la invención del transistor en 1926, documentado en patente, por el físico alemán Julius LILIENFELD [1], y su realización práctica veinte años mas tarde por SHOCKLEY, BARDEEN y BRATTAIN [2], un enorme esfuerzo por parte de investigadores e ingenieros llevó a la realización del circuito integrado desde 1960, que en 1967 ya había llegado a una densidad de 190 transistores por mm^2 . En comparación, los microprocesadores actuales contienen arriba de 3 millones de transistores en el mismo área,- tendencia creciente. Esta tendencia, anotada por Gordon MOORE (fundador de INTEL), y ahora conocido como Ley de MOORE, predice un redoble del número de transistores integrados en un IC de silicio cada dos años (Fig. 1).

Sigue aproximadamente válida hasta el presente. No obstante, existen limitaciones naturales, hasta donde la miniaturización puede llegar. Actuales transistores tienen extensiones de 180 nm , con pases realizados a 90 nm . El espesor del óxido de silicio en la puerta del MOS-FET de tales dimensiones es



debajo de un nm. Estas medidas contrastan con distancias interatómicas en un cristal de silicio, siendo cerca de 2.5 Å, y correspondiente a 4 átomos por nm.

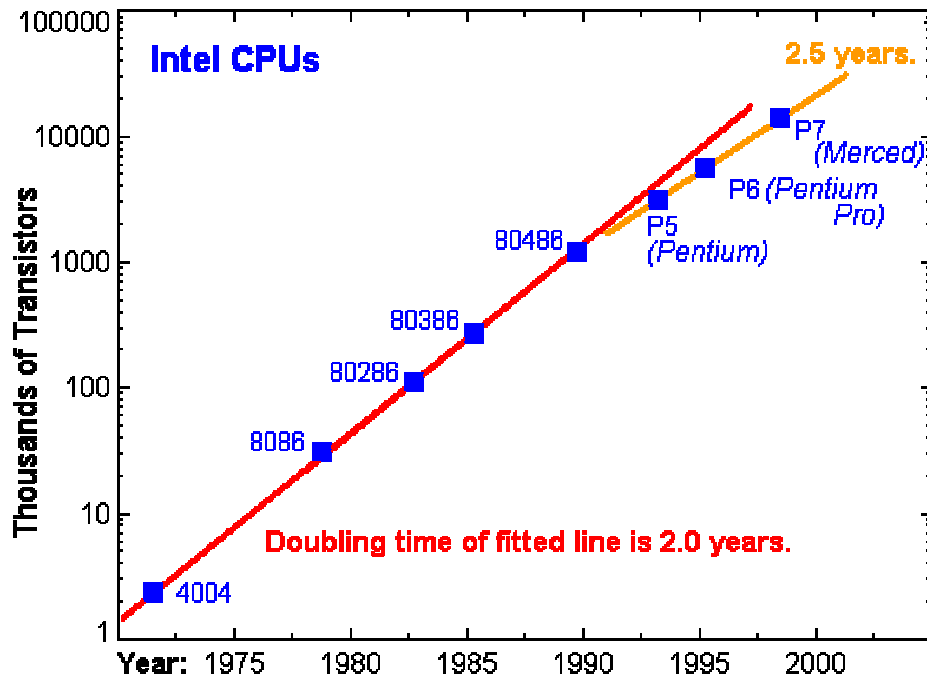


Fig. 1: Incremento del número de transistores en un chip vs. año calendario. Se reconoce un redoble por cada dos años, con un crecimiento disminuido desde la década reciente.

La reducción en escala ('scaling down') del diseño de MOS-FET's está llegando a límites físicos, que inhiben dimensiones debajo de la tal dicha **'barrera de 0.1 μm'**. El voltaje de operación de un MOS-FET es determinado como límite inferior por la energía térmica de los electrones (~26 meV a temperatura ambiente), y como límite superior por el campo eléctrico de ruptura, que genera una avalancha de electrones o bien incrusta electrones energéticos en el aislante. Las distancias entre transistores sobre un chip no pueden ser reducidas a discreción, debido al efecto de tunelamiento cuántico, que toma valores considerables, si las barreras llegan a ser menores en espesor de 10 nm.

El problema de mayor preocupación surge de la generación de calor en los circuitos. Con densidades de corrientes eléctricas, repasando los 10 Mega amperes por cm² en pistas metálicas situadas en varios niveles sobrepuestos,



además de la enorme carga térmica se presenta un efecto destructivo conocido como electromigración (Fig. 2).

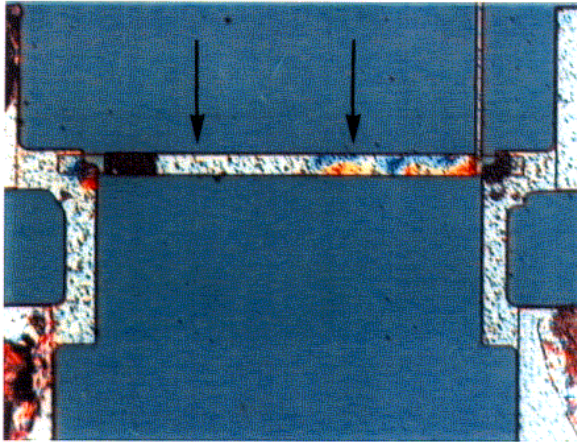


Fig. 2: Efecto de electromigración en pistas metálicas sobre un chip de alta integración. Densidades de corriente arriba de un millón de amperes por centímetro cuadrado provocan la formación de defectos macroscópicos (acción de 'viento electrónico'), y finalmente la interrupción del circuito (véase [3]).

Se busca una continuada integración de transistores por una arquitectura de microcircuitos verticales, aparte de la disminución del tamaño de los FET's dentro del concepto de la tecnología de silicio en la aplicación de efectos cuánticos. Estos últimos permiten controlar el flujo de electrones con campos eléctricos menores. Tal aproximación representa la magneto electrónica, o bien, 'spintronics', una electrónica que pretende aplicar el espín de los electrones para el control de corrientes (Fig. 3).

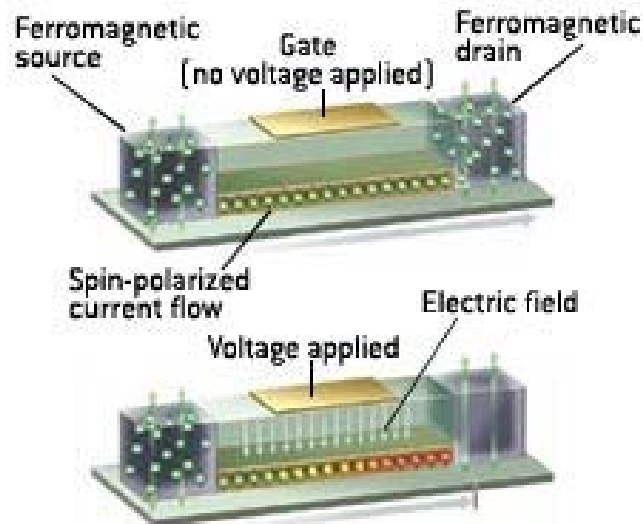




Fig. 3: Spintronic transistor efecto de campo (spin FET) con fuente y drenó ferromagnético. Electrones polarizados del espín entran desde la fuente ferromagnético al canal, donde la existencia de un campo eléctrico los hace rotar. Sin tensión eléctrica la corriente fluye con facilidad, mientras electrones rotados no tienen acceso al drenó (según [4]).

Independientemente de los problemas adversos en la alta integración de circuitos microelectrónicos, han llevado tecnologías sofisticadas, como la epitaxia por haces moleculares (MBE) y la litografía de alta precisión, a la fabricación de estructuras con figuraciones de interfase a escala atómica, resultando en heteroestructuras abruptas, barreras ultra delgadas, pozos cuánticos, alambres y puntos cuánticos, aparte de superredes. Los efectos cuánticos, que actúan en tales estructuras, han dado origen a nuevos dispositivos electrónicos, e incluso a materiales artificiales, resultado de lo llamado 'band structure engineering' (generación de una estructura de bandas electrónicas deseada).

El campo de la electrónica molecular busca la aplicación de moléculas individuales para la realización de funciones en circuitos integrados, que hasta ahora realizan dispositivos semiconductores. Los puntos cuánticos, constituidos de unos cuantos átomos y unos pocos electrones, representan una liga entre los dos caminos. Se sustituye el 'scaling down' de dispositivos semiconductores por el 'scaling up' de dispositivos moleculares (Fig. 4).

Molecular Electronic Wires and Nanometer-Scale, Quantum-Effect Switches

- Molecule can act as wire or as resonant tunneling diode
- Methylene groups create "barriers" along a molecular wire to control transmission of electrons through a quantum well

Advantages:

- Molecules much smaller and every one is exactly alike
- Easily can be made in vast numbers (10^{23} at a time)

NOTE: Figure adapted from descriptive material provided by Prof. James Tour of the University of South Carolina.

MITRE



Fig. 4: Estructuras de moléculas especialmente diseñadas entre electrodos de oro pueden adoptar características similares a de un diodo {o transistor, y establecer un flujo de corriente a través de un estado cuántico (según www.mitre.org/research/nanotech.html) Moléculas apropiadas tienen tamaños en el rango de unos pocos nm. La electrónica molecular comprende materiales orgánicos, que pueden ser modificados a nivel molecular por sustituciones tanto elementales como estructurales. La flexibilidad en composición permite tallar sus propiedades, consiguiendo dispositivos electrónicos moleculares, que son aptos de realizar las funciones, que actualmente se consigue con la electrónica semiconductor, pero sin las limitaciones del FET arriba mencionadas.

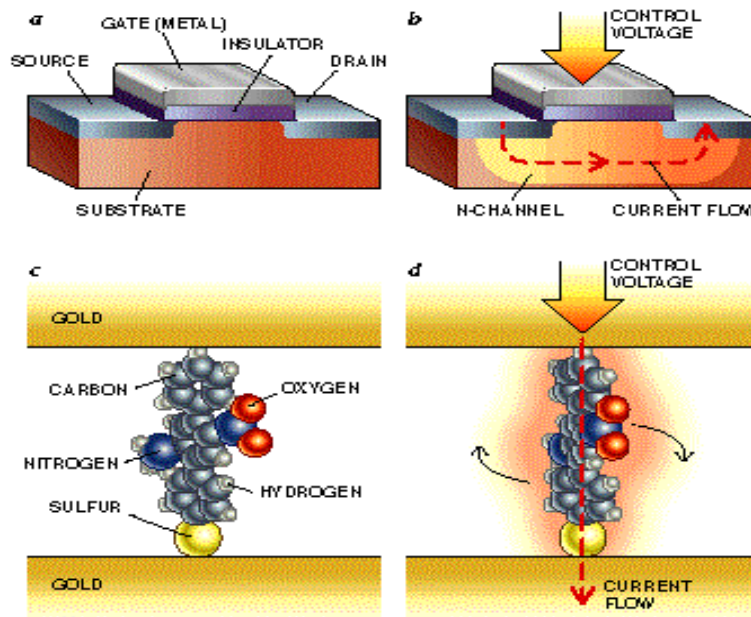


Fig. 5: Diseño y mecanismo de switcheo de un MOS-FET común (a,b, arriba) y un dispositivo molecular (c,d, abajo) con características semejantes.

Se conoce moléculas, que exhiben en forma estable y reproducible propiedades clásicas de switcheo. Recordando que el switch semiconductor puede (en combinaciones) realizar todas las funciones computacionales, lo mismo, en superior integración puede ser esperado de un switch molecular,



que lleva contactos eléctricos en los dos lados de una molécula correspondiente.

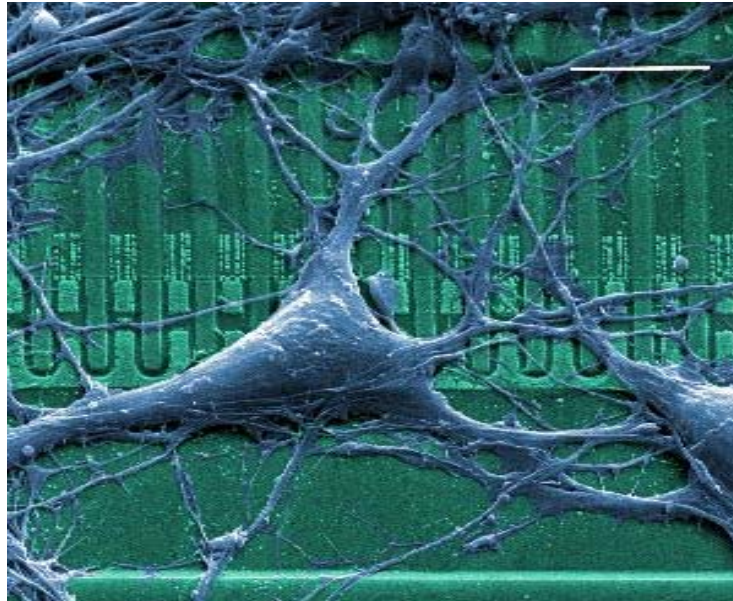


Fig. 6: Neurona de un cerebro de rata sobre un chip de silicio. Se reconoce estructuras FET, que hacen contacto con la célula (según [5]).

Con los avances de la electrónica molecular se abren caminos para una bioelectrónica, que combina la microelectrónica de alta integración con celdas vivas biológicas, que finalmente permitirán una interacción directa con el cerebro humano.

Bibliografía

- [1] Lilienfeld J, US-Patent 1 745 175, Enero 1930
- [2] Bardeen J, Brattain WH, Phys. Rev. 74, 230-1 (1948)
- [3] Zehe A, Cryst. Res. Technol. 37, 817-826 (2002)
- [4] Avshalom D, Flatté M, Samerth M, Sci. Am., May 13 (2002)
- [5] Vassanelli S, Fromherz P, J. Neurosci. 19, 6767 (1999)