

Internet Electronic Journal Nanociencia et Moletrónica

Octubre 2003, Vol. 1; N°1, págs. 1-9

Nanociencia y Nanoelectrónica a Escala Molecular: La Ley de MOORE mas allá de la Microelectrónica convencional

A. Zehe

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Facultad de Ciencias de la Electrónica
e-mail: azehe@siu.buap.mx

recibido: Julio 12, 2003

revisado: Julio 23, 2003

publicado: Octubre 16, 2003

Citation of the article:

A. Zehe, "Nanociencia y Nanoelectrónica a Escala Molecular: La Ley de MOORE mas alla de la Microelectrónica convencional", Internet Electrón. J. Nanocs. Moletrón. 2003, 1(1), 1-9:

<http://www.revista-nanociencia.ece.buap.mx>

Nanociencia y Nanoelectrónica a Escala Molecular: La Ley de MOORE mas allá de la Microelectrónica convencional

A. Zehe

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Facultad de Ciencias de la Electrónica
e-mail: azehe@siu.buap.mx

recibido: Julio 12, 2003

revisado: Julio 23, 2003

publicado: Octubre 16, 2003

Internet Electron. J. Nanocs. Moletrón. 2003, 1(1), pags. 1-9

Resumen:

La miniaturización permanente de circuitos integrados de la microelectrónica semiconductor, desde su primera introducción hace casi medio siglo, ha llevado finalmente a limitaciones nano-tecnológicas severas, requiriendo nuevas aproximaciones para alternativas de post-tecnologías *ULSI* dentro del futuro cercano. Sistemas híbridos como un paso intermedio son agregados de componentes moleculares y materiales a nanoescala convencionales. No obstante será últimamente la aproximación '*bottom up*' en la composición de estructuras y sistemas electrónicos la única forma de poder cumplir con las exigencias extremas en una futura microelectrónica molecular.

Palabras clave :

Microelectrónica, electrónica molecular, nanotecnología, Ley de Moore

Introducción

La microelectrónica, después de avances tecnológicos considerables durante los últimos 45 años, aplica dispositivos más pequeños en extensión que un micrómetro. Aunque esto no cambia la razón de su nombre, -pues sigue siendo microelectrónica-, particularmente los ingenieros tecnólogos, que deben ahora manejar técnicas litográficas con resolución fina a escala de nanómetros, empezaron a renombrar la microelectrónica en nanoelectrónica, y la tecnología microelectrónica en nanotecnología [1]. Confusión en los términos parece preprogramada.

1. Nanotecnología: Definiciones

La palabra ‘nanotecnología’ en este preciso momento ha llegado a ser bastante popular por una razón muy distinta al desenvolvimiento de la micro- o bien 'nano'-electrónica, y por tanto exige una clasificación o definición precisa: Nanotecnología tiene como objetivo la manipulación en tres dimensiones (3D) de moiedades químicas para la conformación de moléculas y conglomerados (*'clusters'*), y finalmente ensamblarlos en dispositivos de mayor tamaño o materiales particulares. Permitirá la explotación de las últimas capacidades tecnológicas de sistemas electrónicos, biológicos, magnéticos, y mecánicos a través de nanodispositivos y -técnicas.

En estos términos, la nanotecnología comprende la manipulación controlada de átomos y moléculas individualmente. Una trampa iónica, que permite encerrar (o liberar) un solo átomo (ión) específico en un pozo de potencial, o dentro de una molécula esférica [2], la separación de macromoléculas según su tamaño [3], y la colocación de átomos uno tras otro sobre la superficie de metal o semiconductor [4] son unos ejemplos de esta tecnología.

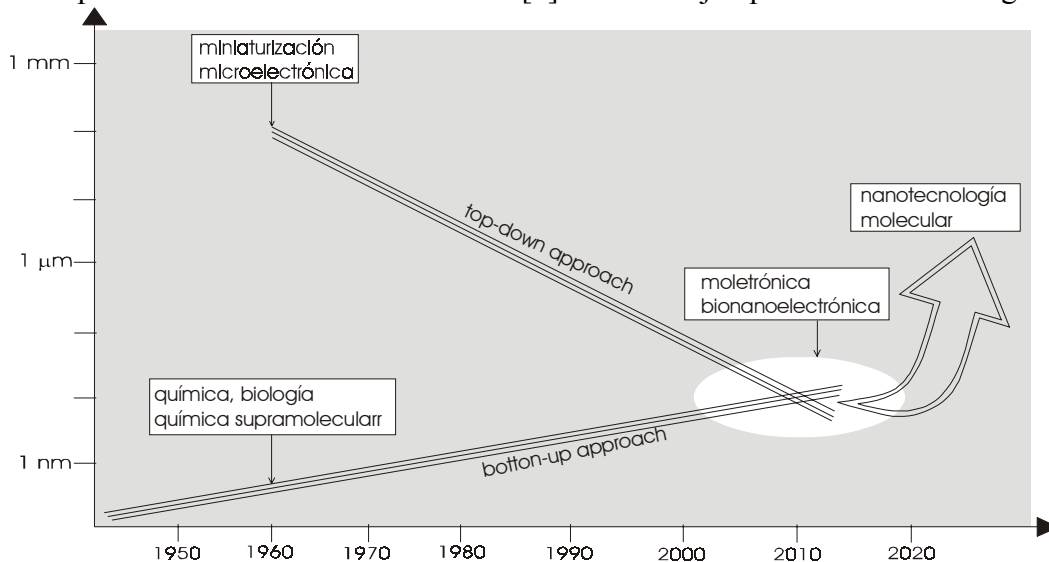


Fig. 1: Para la generación de nanosistemas se ha seguido hasta el momento dos caminos de investigación: A un lado se reducen las dimensiones de los dispositivos en un proceso de miniaturización; al otro se aplica la auto-organización de estructuras para llegar a unidades funcionales mas grandes (*nanobiosistemas*). Futuras innovaciones en el nanomundo surgirán de la combinación interdisciplinaria de las ramas científicas contenidas en los dos caminos y dan lugar a la MOLETRÓNICA.

Obviamente ninguna de las altas tecnologías de la microelectrónica, tan sofisticada que sea, provee las condiciones indispensables de la nanotecnología [1]. La epitaxia por haz molecular (MBE), aun que permitiendo el crecimiento de capas ultradelgadas con precisión y control de hasta una monocapa atómica en dirección de crecimiento, trae consigo que esta capa se extiende sobre un área ancha en las otras dos dimensiones sin modo de control con precisión atómica. Una situación semejante aplica para la microlitografía usada en la fabricación de estructuras laterales en capas delgadas.

Tecnologías de difusión atómica y de *sputtering*, ampliamente usadas en la fabricación de dispositivos y circuitos integrados, comprenden por naturaleza física conjuntos grandes de átomos o moléculas sin la posibilidad de colocar un cierto átomo a un cierto sitio de una red cristalina. La nanotecnología es una ciencia híbrida que combina las ingenierías con la química y la biología, y muy al contrario de la aproximación tecnológica arriba-abajo (*top-down approach*) en el desenvolvimiento de la microelectrónica pretende la conformación de estructuras y sistemas más complejos en una aproximación abajo-arriba (*bottom-up approach*). Esta última aproximación se conoce con el nombre de Electrónica Molecular (moletrónica) [5]. La creación de switches, transistores, puertas lógicas y memorias desde pequeños arreglos atómicos o moléculas, que pueden llevar a una computadora completa, es el segmento sobresaliente de la nanotecnología. Computadoras moleculares ya son una (aunque inestable) realidad en los laboratorios [6].

2. Herramientas de la electrónica molecular

La microelectrónica ha pasado durante el último medio siglo por un proceso evolutivo de miniaturización de sus componentes, -transistores, capacitancias, ventanas de contacto, y conexiones-, principalmente caracterizado por los avances en la litografía (submicrométrica) [1]. El desarrollo desde su inicio 1961 con el primer chip ha cumplido la tal llamada Ley de Moore, una inspirada observación postulando, que el número de transistores por área de oblea y así la capacidad de los microprocesadores se duplica cada 18 meses. Es una ley exponencial, que se refleja también en la figura 1. No es una ley natural, y por tanto puede cesar, si las condiciones de campo se modifican. Para que la progresión, detectada por Moore sea continua, se requiere encontrar soluciones, que difícilmente forman parte de las actuales tecnologías de la microelectrónica. Límites físicos, tecnológicos y también financieras impiden la fabricación y funcionalidad de estructuras mucho mas pequeñas [5].

La nanotecnología molecular comprende un cambio revolucionario en lugar de un cambio evolutivo en la conformación de estructuras pequeñas y sistemas complejos debido a su aproximación intrínseca de manipular en forma controlada átomos y moléculas. Esto implica posicionar cada átomo en el lugar correcto, y de esta manera realizar prácticamente cualquier estructura, que es consistente con las leyes en detalles moleculares de la física.

Se conoce varios caminos, que llevan a la ingeniería molecular. De más importancia se consideran la ingeniería de nanobiosistemas [7], la síntesis química de supramoléculas [8], y la mecanosíntesis por manipulación física de átomos y moléculas individuales. Los avances en cada uno de ellos son impresionantes, pensando solamente en la biocomputadora en base a la ADN [9], en macromoléculas para la computación cuántica y la realización de operaciones electrónicas, o simplemente en el logo de la Fig. 2. Este último fue creado con la aplicación de un microscopio de fuerza atómica (AFM).

De hecho, el microscopio de barrido por tunelamiento (STM) y el microscopio de fuerza atómica (AFM) [10] son los instrumentos más idóneos y prometedores para la mecano-síntesis de estructuras moleculares y nanodispositivos de la moletrónica. Su eficiencia, al otro lado, depende aun de herramientas combinatorios mas sofisticadas. Tomaría miles de años a un solo 'nanoensamblador' por AFM producir algún material un átomo a la vez. En la misma lógica tomaría minutos, si miles de millones de nanoensambladores submicroscópicos se dedican a esta tarea en forma paralela y programada.

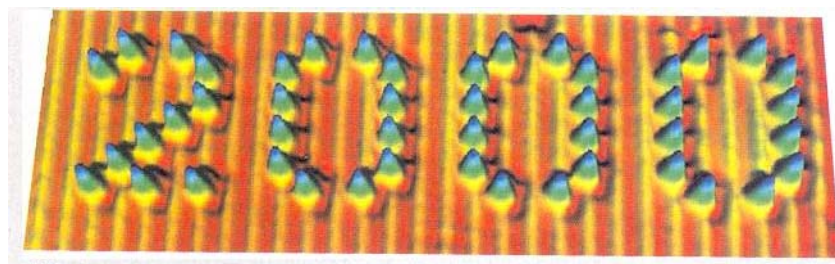


Fig. 2: Molécula de CO sobre una superficie de Cu. La escritura tiene una extensión de 15.6 nm [4]

La nanotecnología puede crear nanomáquinas, algo como igual a las presentes en la naturaleza, ya se hizo en múltiples variantes (*nanoscale machinery*). Su combinación con computadoras moleculares programadas los llevaría a los 'nanobots', versiones microscópicas de los robots, capaces de replicarse, y de ensamblar (ó desensamblar) cualquier material, sea estos de alimentos, contaminantes, tejidos cancerosos, ó de arreglo electrónico.

La moletrónica también ha tenido contribuciones considerables de la química supramolecular. Al conectar ciertas macromoléculas entre contactos metálicos se detecta propiedades eléctricas semejantes a las conocidas en diodos, transistores, e incluso en memorias, -diferente solamente por su tamaño diminuto [11]. Con nanotubitos de carbono, estructuras macromoleculares artificiales, se fabrican transistores nanométricos con propiedades superiores a cualquier transistor de silicio conocido. ¿Tendrán los nanotubitos biológicos, como por ejemplo el virus mosaico de tabaco (TMV), propiedades semejantes al nanotubito de carbono, excepto de contar con las ventajas de un nanobiosistema respecto a auto-ensamble y auto-replicación [12]?

La semejanza geométrica entre nanotubitos de carbono y el virus mosaico de tabaco a un lado (Fig.3), pero la aproximación completamente diferente de la realización tecnológica o biológica de estructura sugieren un estudio a fondo de las propiedades físicas del TMV. Como paso primero, se requiere la separación en tamaño de una población TMV crecida naturalmente. Los virus separados son usados para su cultivación y análisis. Particularmente requieren aplicaciones en una futura electrónica biomolecular conocimiento y datos de la conductividad eléctrica, el comportamiento térmico y mecánico, así como también de la actividad química.

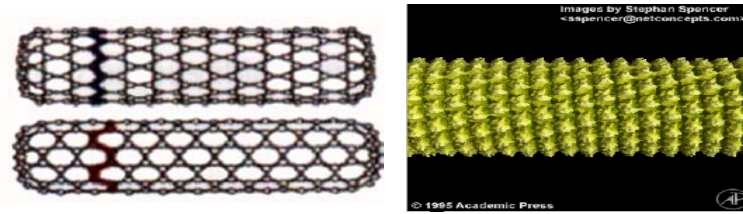


Fig.2: Estructura geométrica y composición en tamaño de nanotubitos de carbono (izq.) y el virus mosaico de tabaco (der.).

El TMV es el virus de planta mas persistente conocido. Se encontró una supervivencia por 50 años en plantas secas. Una vez infectadas, las plantas quedan así. Introduciendo el virus, se multiplica por inducir celdas de plata a producir mas virus [13]. Como se puede apreciar en la figura 3, el TMV tiene una forma cilíndrica con un diámetro externo $2R=18\text{ nm}$ y una extensión de entre $2L=50\dots1000\text{ nm}$. La razón radio-por-largo $e=R/L$ se extiende sobre mas que un orden de magnitud entre $e=0.018\dots0.3$, que resulta en una propiedad favorable para poder separar poblaciones del virus mosaico de tabaco por la técnica de dielectroforesis [ruso]. Este método se basa en propiedades dieléctricas intrínsecas de células y partículas, que se expone a un campo eléctrico. La fuerza dielectroforética $\langle F_{DEP} \rangle$ sobre una partícula dieléctrica expuesta a un campo eléctrico \vec{E} no-homogéneo y variable en tiempo es

$$\langle F_{DEP} \rangle = \frac{1}{2} \text{Re}(\vec{m} \cdot \nabla) \vec{E} \quad (1)$$

donde Re denota la parte real del producto escalar, \vec{m} es el momento dipolar inducido en la partícula, y $\nabla \vec{E}$ es el gradiente del campo eléctrico entre los contactos metálicos en la cámara con la suspensión. Por definición es el momento dipolar inducido, \vec{m} , proporcional al volumen V del virus, el campo eléctrico $E=E_0 \cdot \exp(j\omega t)$ con la frecuencia circular ω , y la permitividad $\epsilon_0 \epsilon_m$ del medio de suspensión rodeando la partícula.

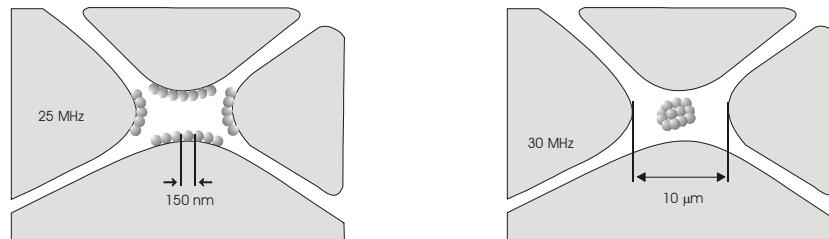


Fig. 4: Arreglo de microcontactos usados en experimentos de dielectroforesis. La distancia entre contactos es usualmente de $10\ \mu\text{m}$. Las partículas experimentan una fuerza positiva o negativa dependiendo de la frecuencia ω del campo eléctrico aplicado. La formación de arreglos lineales de partículas (izq.) deja pensar en un modo de generar nanoalambres.

La composición biomolecular, características geométricas, y la estabilidad en tiempo hacen el TMV un objeto microbio electrónico interesante. Un requerimiento principal para su aprovechamiento consiste en la existencia práctica de grupos de muestras con longitud definida. Este problema se trata con mas detalle en [14].

La creación de herramientas para la nanociencia y moletrónica se encuentra en pleno desarrollo, igual como la explosión de ideas novedosas para ellos [15].

3. Potencial de la nanotecnología

Los mejores ejemplos de aplicación en desarrollo son claramente asociados con la industria de la tecnología informática, -particularmente la electrónica molecular (moletrónica). No obstante, el potencial y la diversidad de la nanotecnología es por mucho mas amplio. Esto implica la capacidad de producir alimentos, mejorar la salud humana inclusive la longelivedad, controlar contaminación, aumentar la conversión de energía, y otros mas. El destacado ejemplo de la auto-replicación del 'patrón vida biológica' conocemos en la genética, o bien, en las máquinas moleculares genéticas, presentes en la naturaleza. Las proteínas, por ejemplo, operan como máquinas moleculares programadas para la manipulación de átomos individuales. Su estructura física y su funcionalidad específica son conocidas, y por tanto pueden ser manipuladas por el hombre. La naturaleza es la maestra sobresaliente en procesos de auto-ensamble, de auto-diagnóstico y de auto-saneamiento, que al introducir estos procesos del mundo biológico en materiales y dispositivos, resultan tecnologías de fabricación radicalmente distintas a las conocidas.

Con una vista mas cercana, la nanotecnología molecular promete la solución al problema inminente de la microelectrónica integrada en semiconductores. Por la continuada disminución de tamaños característicos en transistores y memorias necesarias en las potentes computadoras del futuro cercano, la fisica y tecnología microelectrónica están confrontadas con límites fundamentales, como por ejemplo el tunelamiento mecánico-cuántico de electrones. Se harán presentes con toda su fuerza eliminador al final de esta década.

La búsqueda de dispositivos en base a moléculas naturales o manipuladas por el hombre, que permiten la realización de las funciones electrónicas conocidas de los dispositivos actuales de la electrónica semiconductor, se realizan con intensa actividad. Con la demostración de switches, transistores y memorias moleculares, la computadora molecular es una opción bastante real, - en principio.

El costo de producción, no obstante, es un criterio con importancia en la nanotecnología. El requerimiento de ensamble posicional de elementos moleculares de construcción implica la necesidad de una tecnología robótica molecular, es decir, de nanobots con alta precisión a escala molecular. Su función sería el ensamble de versiones extremadamente miniaturizadas de sus contrapartes macroscópicas.

De hecho, ensamble posicional se practica en la fabricación macroscópica actual por ejemplo en la estructuración litográfica. La auto-replicación de sistemas de fabricación, como se conoce de la naturaleza, será parte indispensable de la nanotecnología molecular.

Se puede anticipar unas aplicaciones de la nanotecnología: Computadoras de un potencial desconocido hasta el momento (viz. Fig. 4), el auto-ensamble de cualquier producto de consumo, nanotecnología médica para la eliminación de enfermedades e incluso del envejecimiento, la producción molecular de alimentos, la recuperación de muchas plantas y animales extintas, el control de contaminación del ambiente, y tantas muchas mas.

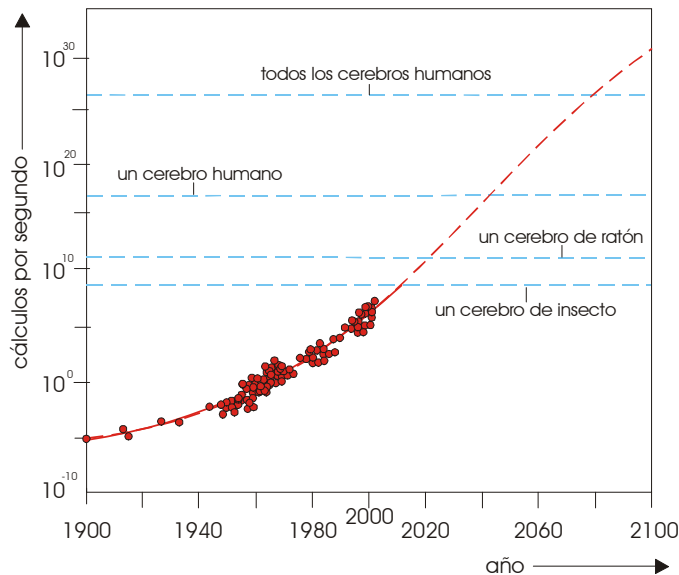


Fig. 4: El avance acelerado en velocidad de computación, que una PC tendrá en años venideros

4. Conclusiones

La nanotecnología molecular no solamente es una necesidad forzada por los límites naturales de la electrónica integrada en estado sólido, cuyo avance es requerido para la tecnología de información y de inteligencia artificial, también es una posibilidad real con todas las consecuencias, que sus logros implican. Las primeras herramientas para el control individual de átomos en la conformación de estructuras funcionales existen, y nuevas técnicas con potencial de auto-ensamble, auto-replicación y auto-corrección de fallas están en la mira de los investigadores. El estado inicial en que se encuentra la rama, guarda muchas oportunidades para una participación activa, incluso sin contar con los mas sofisticados laboratorios. La combinación de conocimiento multidisciplinario es un paso indispensable para el fin.

Al otro lado están presentes los efectos en la nanotecnología sobre el desarrollo de la humanidad. Ciencia y ética en la nanotecnología no solamente merecen el mismo nivel de atención [16], para el bien de la humanidad es indispensable adherir a mecanismos que aseguran su sobrevivencia. En la elaboración de estos mecanismos, todos tenemos responsabilidades.

Bibliografía

- [1] A. Zehe *Tecnología Epitaxial de Silicio*, ISBN 3-8311-1438-2, Alemania (2000); *Microelectrónica*, ISBN 968-863-313-7, México (1999); *Herramientas Analíticas de Interfases*, ISBN 3-8311-3262-3, Alemania (2001)
- [2] H.C. Naegerl, Phys Rev. A60, 145 (1999)
- [3] A. Zehe et al., Braz. J. Biomed. Res. vol. 37 (2004)
- [4] G. Meyer, K.H. Rieder, Physik in unserer Zeit 31, 8 (2000)
- [5] <http://www.moletronica.buap.mx> (2002)
- [6] N.A. Gershenfeld, I.L. Chuang, Science 275, 350 (1997)
- [7] Braun, E.; Y. Eichen; U. Sivan & G. Ben-Yoseph, *Self Assembly of Nanometer Scale Electronics by Biotechnology*. Nature 391: 775-781. (1998)
- [8] Sawamura, M.; K. Kawai; Y. Matsuo; K. Kaine, T. Kato & E. Nakamura. *Stacking of conical molecules with a fullerene apex into polar columns in crystals and liquid crystals*. Nature 419: 702-705. (2002)
- [9] G. Paun, Computing with biomoléculas, Springer Verlag (1998)
- [10] G. Binnig, C.F. Quate, Ch. Gerber, Phys. Rev. Lett. 56, 930 (1986) & Rohrer (1982)
- [11] Chen, J.; MA Reed; AM Rawlett & JM Tour, *Observation of a Large On-Off Ratio and Negative Differential Resistance en an Electronic Molecular Switch*. Science 286: 1550-1556. (1999)
- [12] Morgan, H.: M.P. Highes & N.G. Green, *Separation of Submicron Bioparticles by Dielectrophoresis*, Biophys. J. 77: 516. (1999)
- [13] www.extension.umn.edu/distribution/horticulture/DG1168.html.
- [14] A. Sanchez, A. Ramírez, A. Zehe. *El potencial del virus mosaico de tabaco (TMV) como biosistema de la electrónica molecular*, Internet Electrón. J. Nanocs. Moletrón. vol.1, N°2 (2003)
- [15] A. Zehe, Tutorial *Nanociencias-La nueva revolución científico-tecnológica*. Internet Electrón. J. Nanocs. Moletrón. vol.1, N°1 (2003)
- [16] C. Mnuvivalla, Nanotechnology 14, RS-13 (2003)