

# Internet Electronic Journal Nanociencia et Moletrónica

Marzo 2004, Vol. 2; N°1, págs. 152-162

## **Alambres Nanometricos y Conductores Moleculares en Aplicaciones de Nanoelectronica Integrada**

**A. Patiño, A. Ramírez, A. Salmeron\*, A. Zehe**

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
Facultad de Ciencias de la Electrónica, Departamento de Posgrado

\*Centro de Química, Instituto de Ciencias  
Apdo. Postal. 1505, Puebla 72000 México  
e-mail: [aguila@ece.buap.mx](mailto:aguila@ece.buap.mx)

recibido: Enero 12, 2004

revisado: Febrero 22, 2004

publicado: Junio 29, 2004

Citation of the article:

A. Patiño, A. Ramírez, A. Salmeron\*, A. Zehe "ALAMBRES NANOMETRICOS Y CONDUCTORES MOLECULARES EN APLICACIONES DE NANO ELECTRONICA INTEGRADA", Internet Electrón. J. Nanocs. Moletrón. 2004, 2(1), 152-162:

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

---

Copyright © 2004 BUAP

## **Alambres Nanometricos y Conductores Moleculares en Aplicaciones de Nanoelectronica Integrada**

**A. Patiño, A. Ramírez, A. Salmeron\*, A. Zehe**

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
Facultad de Ciencias de la Electrónica, Departamento de Posgrado  
\*Centro de Química, Instituto de Ciencias  
Apdo. Postal. 1505, Puebla 72000 México  
e-mail: [aguila@ece.buap.mx](mailto:aguila@ece.buap.mx)

recibido: Enero 12, 2004

revisado: Febrero 22, 2004  
2004

publicado: Junio 29,

---

*Internet Electron. J. Nanocs. Moletrón. 2004, 2(1), pags. 152-162*

### **Resumen**

Los límites físicos en el desempeño de dispositivos eléctricos en base a silicio exigen una nueva aproximación a la microelectrónica, en donde moléculas reemplazan a las estructuras basadas en semiconductores. Uno de estos límites se establece por el transporte destructivo de masa debido a la electromigración en alambres metálicos del orden nanométrico, y la cantidad enorme de calor que se genera por la alta densidad de carga involucrada en el transporte de una señal. Se propone un nuevo enfoque por medio del cual se seleccionan elementos que forman una matriz de metales, con base en su valencia química, con el fin de mejorar las propiedades de esta matriz de metales. La tecnología basada en el silicio se desarrolla en paralelo con la electrónica molecular durante la siguiente década. Para lograr este propósito se requiere del entendimiento de los mecanismos involucrados en la conductividad eléctrica, además del tener conocimientos en diseño químico de alambres moleculares. Una característica sobresaliente de materiales, que muestran transferencia de carga eléctrica, consiste en la posibilidad de manipular sus propiedades por medio de un acoplamiento entre estructura y transferencia de carga eléctrica.

En el siguiente trabajo se discuten aspectos materiales en alambres nanométricos.

**Palabras clave:** nanopistas, nanoalambres, supramoléculas, transferencia de carga compleja, supresión de huecos.

---

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

## 1. Introducción

Las estructuras lógicas ultra-rápidas y ultra-densas en los sistemas computacionales del futuro se basan en la electrónica molecular.

Dispositivos existentes demuestran fuertes límites de desempeño, las mas severas limitantes en la realización de esquemas de integración en el orden de gigaescala y teraescala son impuestas por las leyes básicas de la física. El efecto del acarreo de electrones, así como de partículas en los alambres eléctricos se determina por su comportamiento como onda y es controlado por la física cuántica. Tal transición puede ocurrir en interconexiones eléctricas convencionales antes de llegar a los dispositivos de 50 nm [1]. Los fenómenos de la mecánica cuántica, como el tuneo cuántico, la dispersión de superficie, el transporte en forma de onda y el confinamiento a un tamaño cuántico, afectan la conducción electrónica. La lenta transición de los circuitos integrados de ultra-alta escala no se debe al tiempo de transición de los transistores, si no al tiempo que toma cada electrón en viajar entre las conexiones metálicas de los dispositivos.

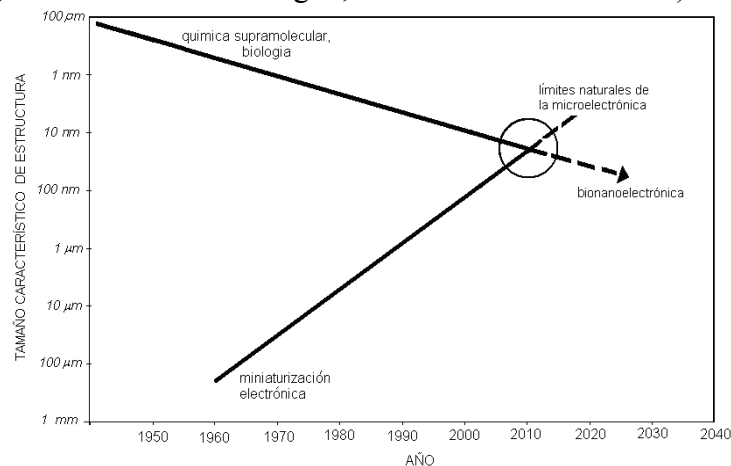
Los bloques fundamentales de construcción para los dispositivos electrónicos moleculares son los alambres moleculares. Por razones de operación, estos consisten en unidades moleculares conectadas a conductores metálicos que sirven como una reserva continua de electrones. Los procesos de transferencia electrónica, en particular la transferencia de electrones intramolecular y los procesos de transferencia a través de enlaces moleculares son de una importancia muy especial.

El tiempo de transición a través de interconexiones electrónicas de escala molecular es mucho mas pequeño que el que se muestra en alambres metálicos, lo cual resulta en dispositivos computacionales que operan en velocidades mucho mayores que las que se presentan en un dispositivo convencional basado en arreglos de silicio [2]. Mientas los mejores sistemas integrados de cómputo en el estado del arte basados en silicio contienen  $10^{10}$  dispositivos, las computadoras basadas en la tecnología molecular pueden contener  $10^{23}$  en un espacio muy pequeño. Los sistemas paralelos pueden aumentar cualquier velocidad de operación, sin embargo el direccionamiento en arreglos a larga escala en la electrónica molecular se ha de resolver todavía. Un enfoque diferente orientado hacia el cómputo de alta potencia, se basa en el cálculo cuántico, el cual ha sido resuelto por medio del control de los estados cuánticos, en especial las estructuras moleculares [3]. Dadas las deficiencias en los sistemas de interconexión metálica, se presenta la necesidad de interconexiones moleculares.

El objetivo de este artículo es por un lado presentar los resultados teóricos de la agregación de impurezas y complejos de huecos en microalambres metálicos, en donde la estructura de valencia electrónica de átomos es importante. Por otro lado se estudian conductores moleculares, así como la electrónica basada en estructuras moleculares considerando en particular la transferencia de carga compleja del tipo Zn-naphtholamines TCNQ.

## 2. Nanoalambres metálicos

La reducción en el tamaño de los dispositivos ha sido el mayor problema que ha enfrentado el crecimiento de los diseños de alta integración, figura 1. Al mismo tiempo las dimensiones geométricas se encierran en la escala cuántica de la conducción de electrones (longitud de onda de DeBroglie, el radio efectivo de Bohr).



**Figura 1. Fabricación de sistemas a diferentes escalas**

Mientras que los metales tridimensionales se pueden describir por la teoría líquida de Fermi, la cual se aplica para un sistema de electrones en tres dimensiones, no es válida en cualquier otra dimensión. Existen tecnologías para la construcción de alambres metálicos con anchos de varios cientos de nanómetros hasta los 5 nm [4]. Las tecnologías más recientes nos permiten la construcción de alambres con alrededor de 10 a 15 átomos de metal. Se ha encontrado que las propiedades eléctricas, mecánicas, y algunas otras de estos alambres microscópicos, cambian significativamente conforme las dimensiones se acercan a los límites de una extrema nanoescala. El efecto más significativo se encuentra en el comportamiento de conductividad eléctrica, el cual junto con las dimensiones laterales depende del ancho (nanoescala), y del estado del desorden atómico de éstas. Son las interacciones electrón-electrón y electrón-fotón en sistemas metálicos unidimensionales la causa de peculiaridades de este tipo.

Aun mucho antes de que la mecánica cuántica entre en los terrenos de los alambres metálicos a nivel nanoescala, existe otro fenómeno físico que afecta las posibilidades de realizarlo. Debido a la reducida sección transversal de nanoalambres en circuitos integrados, la densidad de corriente electrónica aumenta por encima de  $10^7$  Amperes por centímetro cuadrado. Esto causa un transporte difuso del material de matriz como resultado de una transferencia de momento entre electrones y átomos del alambre metálico. La formación de huecos o cortos circuitos debido al crecimiento de montoncillos es el principal motivo de que el conductor llegue a destruirse. La necesidad de mejores materiales conductores (como el Aluminio) en dimensiones submicrométricas nos muestra uno de los más importantes cambios en la tecnología de materiales desde que la industria del semiconductor inició.

El cobre junto con sus propiedades inherentes de baja resistencia eléctrica ( $\rho=1.55 \mu\Omega cm$ ) y una considerable resistencia a la electromigración se convierte en el metal de interés con las características necesarias para tecnologías de  $0.13$  y  $0.1 \mu m$ . La investigación para reemplazar al cobre aun esta en desarrollo, está orientada a la mejoría de aleaciones para el cobre o incluso otro metal. Desde el punto de vista de la conductividad, la plata como el mejor conductor que se conoce bajo condiciones normales con  $\rho=1.49 \mu\Omega cm$  pasa al cobre por alrededor de un 4%. El cual es mucho más pequeño que el 40% del cobre con respecto al aluminio en donde  $\rho=2.70 \mu\Omega cm$ .

Mientras se siguen encontrando aleaciones que mejoran la resistencia a la electromigración, impurezas solubles pueden mejorar la resistividad eléctrica en un orden de  $1 \mu\Omega cm$  por átomo %. La elección de elementos solubles implica la consideración de fases dobles y compuestas, las cuales tienen resistividades mucho más altas que el cobre puro o la plata y pueden aumentar su resistividad de acuerdo a su fracción del volumen. Sin embargo, será de importancia primaria para cualquier adición, la supresión del tuneo de la electromigración y consecuentemente fallas de circuito abierto. En este capítulo se discutirán reglas de selección para los elementos solutos en el cobre y la plata con una perspectiva de incrementar la resistencia a la formación de huecos en la electromigración, las cuales se basan en el estado electrónico de carga y en la repulsión coulombiana del complejo Átomo Soluta-Vacante (SAV). Se considera que la generación de estabilidad de pares-SAV esta relacionada con el tamaño de los átomos involucrados y con la activación de su comportamiento térmico.

Se están haciendo esfuerzos considerables con el fin de esclarecer con bases más generales la naturaleza de los huecos en la electromigración y para predecir su apariencia y morfología bajo condiciones prácticas. Datos previos de electromigración de metales puros y aleaciones disueltas en Al, Cu, Ag, y otros ponen de manifiesto un desempeño superior en interconexiones cristalinas [5]. En particular es decisiva la naturaleza química de los elementos de la aleación en una matriz para una supresión de erosión por medio de huecos.

La formación y el crecimiento de huecos de erosión en los metales es un proceso cinético. La correspondiente ecuación cinética se puede formular en analogía con la teoría de nucleación. Nosotros caracterizaremos a un hueco en una aleación soluble como una maya compleja que consiste de  $v$ -vacantes, rodeados por  $s$ -átomos solutos. El número  $N(v,s;t)$  al tiempo  $t$  obedece a una ecuación maestra en donde la razón de transición de los complejos de pares  $[v,s]$  a los complejos de pares  $[v+1,s]$  debido a la unión de una vacante con un hueco se denota por  $\Pi(v+1,s;v,s)$ .

Se supone que la razón de transición  $\Pi$  depende del flujo total  $J_v^n$  de vacantes en una región alrededor de complejos de pares  $[v,s]$ , y en la razón de reacción  $\Phi$  para el proceso de su fusión,

$$J_v^n \cdot \Phi = \Pi(v+1,s;v,s) \quad (1)$$

Con el objeto de formar una gran cantidad de complejos de pares  $[v,s]$  se necesita un flujo permanente  $J_v^n$  para traer una gran cantidad de vacantes juntas. Tales condiciones se cumplen en la electromigración.

El flujo de vacantes  $J_v^n$  se determina por el viento de electrones, la fuerza del campo eléctrico, la tensión de electromigración inducida y la deformación de la red debida a las vacantes y átomos solutos.

Nosotros argumentamos que la energía de la estructura metálica debida a la deformación de la red será minimizada si las vacantes son atrapadas por átomos solutos por medio de un potencial de atracción entre ambos. Una consecuencia de esta atracción es el incremento de la población de átomos solutos alrededor de complejos de pares  $[v,s]$ , así como una atracción de vacantes por los complejos de pares  $[v,s]$ , de hecho un importante argumento para este hecho resulta ser la atracción entre vacantes y átomos solutos debida a la deformación, esto es (i) los átomos solutos están involucrados en el proceso de difusión de huecos, y (ii) que la concentración de átomos solutos incrementa fuertemente alrededor de los huecos después de la electromigración [6,7]. Las energías de enlace entre vacantes y átomos solutos en una matriz de metales son del orden de 0.1-0.2 eV.

Se ha encontrado [cita Dr. Zehe numerada] que la formación de huecos de erosión en la electromigración aumenta si la suma de los electrones de valencia de la matriz de átomos metálicos y los electrones de valencia de las impurezas atómicas de la aleación es un numero par, la formación de huecos se suprime en aleaciones en donde la suma de los electrones de valencia de la matriz de átomos metálicos y los electrones de valencia de las impurezas atómicas de la aleación es un numero impar [8].

De acuerdo a esta regla en una matriz de Cu (estado de los electrones de valencia  $4 s^1$ ), la presencia de In (estado de los electrones de valencia  $5 p^1$ ) o Ag (estado de los electrones de valencia  $5 s^1$ ) no previene la formación de huecos pero la presencia de Sn (valencia  $5 p^2$ ) si, como se ha observado [7]. Lo mismo para el Si (valencia  $3 p^2$ ) en una matriz de Al (valencia  $3 p^1$ ) [9], o el O (valencia  $2 p^4$ ) en una matriz de Ag (valencia  $5 s^1$ ) [10]. Por otro lado, la formación de huecos en el Au (valencia  $6 s^1$ ) con Ag está de acuerdo con esta regla. Experimentos muy cuidadosos en cobre dopado con aluminio nos muestran una fuerte formación de huecos por electromigración [11].

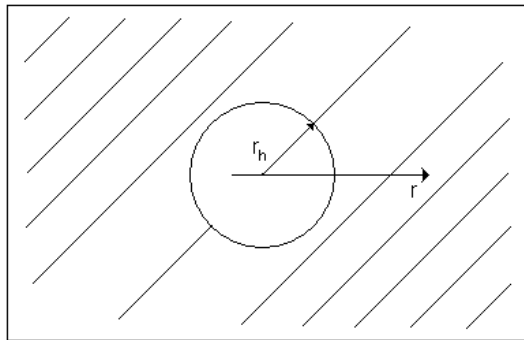
Con objeto de relacionar la razón de reacción  $\Phi$  de la ecuación (1) a la difusión de una vacante con un complejo par  $[v,s]$ , se demuestra la importancia de la valencia electrónica de una estructura matricial de átomos solutos. Este problema de estructuras electrónicas que se muestran entre una matriz y las vacantes auto contenidas así como átomos solutos, se han tratado por las aproximaciones funcionales de densidad en el modelo de jellium [12,13]. De hecho el modelo simple de jellium, en donde los electrones de valencia desubicados se mueven en una carga homogénea positiva, ha sido utilizado para estudiar las propiedades electrónicas de los metales, y mas recientemente también en pequeños clusters metálicos [14]. La densidad electrónica  $n(z)$  cerca de la superficie de jellium experimenta un paso aunque no un abrupto decremento hacia las vacantes. Se conocen diferentes enfoques para el calculo de  $n(z)$ . Para el radio de un hueco  $r_h$  dentro de una jellium se selecciona el siguiente conjunto de tríadas esféricas [8].

$$n(r) = \tilde{n} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \exp[-\beta(r - r_e)] \cdot \theta(r - r_e) \right\} + \frac{1}{2} \tilde{n} \cdot (\cosh \gamma \cdot r_e)^{-1} \cdot \cosh \gamma \cdot r \cdot \theta(r_e - r) \quad (2)$$

siendo  $\Phi(z)$  el lado que más peso tiene en la función paso, y  $\beta$  es el parámetro de decaimiento en la densidad electrónica.  $\tilde{N}$  es la densidad de volumen, y  $r_e$  el radio del núcleo, figura 2. Para metales monovalentes con densidad electrónica  $n$ , un vacío de  $v$  huecos corresponde a un radio de  $r_h^3 = (3/4 v/\pi n)$ . Los parámetros  $\beta$  y  $\gamma$  de la ecuación 2 son dados por condiciones de normalización y continuidad de su primera derivada.

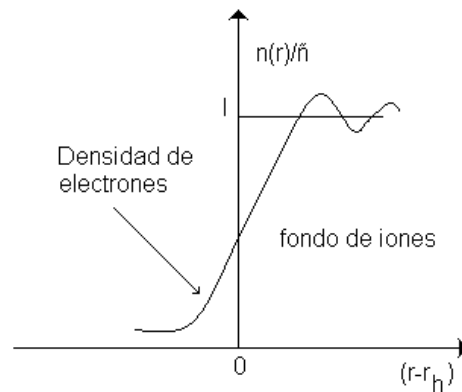
La inmigración de electrones en las vacantes, y su carga efectiva se vuelve importante para la migración y la fusión de huecos. Un calculo detallado de la estructura electrónica de las vacantes, por ejemplo aluminio, entrega una carga efectiva negativa  $e_v$  de las vacantes alrededor de  $e_v=0.2 e$ , siendo  $e$  la carga elemental [12]. Debido a los efectos de polarización se genera una densidad de carga positiva en los alrededores de la matriz que son descritas comúnmente por medio de un estudio de los campos debidos a la función dieléctrica  $\epsilon(q, \omega)$ . Con  $k_{TF}^{-1}$  la longitud de apantallamiento Thomas-Fermi, la energía potencial entre dos puntos de carga dentro de un sistema de electrones gas-jellium [15] esta dada por

$$U(r_{12}) = e_{v1} e_{v2} \exp(-r_{12} k_{TF}) / r_{12} \quad (3)$$



**Figura 2 (a).**

Huecos de radio  $r_h$  en un metal jellium



**Figura 2 (b).**

Densidad de electrones alrededor de una interfase de huecos  $r=r_h$

Esta repulsión de Coulomb entre las vacantes o entre los complejos de pares  $[v,s]$  lleva a la formación de una barrera y neutraliza su fusión. En metales puros con una estructura perfecta la formación de huecos se suprime. Sin embargo a distancias del orden de un espacio de red, la ganancia en la energía por la reducción de la energía en la superficie puede dominar, y una vez que se supera la barrera, las vacantes finalmente se fusionan.

La sustitución de un átomo de matriz por un átomo soluto resulta en dos efectos: la red se puede distorsionar, se puede argumentar que este efecto estructural nos conduce a una atracción efectiva entre un átomo soluto y la vacante. Además la estructura electrónica se modifica debido a que la valencia del átomo matriz se sustituye por la valencia del átomo soluto, es decir electrones adicionales se pueden introducir por medio del átomo soluto, el cual se acerca al sitio de impureza.

La cantidad adicional de electrones es igual a la diferencia entre la de los electrones de valencia en la matriz y los electrones de valencia solutos. Se asume que los electrones adicionales se mueven en órbitas cerca de los átomos solutos. El apareamiento de electrones es relativamente fuerte el uno con el otro, mientras que la separación de electrones no es posible y se puede tratar como una contribución adicional de electrones cerca de las impurezas. Tal incremento en la densidad de electrones también conduce a un incremento de la carga efectiva, dentro de las vacantes. Como una simple estimación la cantidad adicional de electrones separados se asume como una distribución homogénea dentro de la esfera de  $f$  átomos vecinos así la carga efectiva de vacantes se incrementa por un factor  $(f+1)/f$ .

La estabilidad de pares-SAV durante la migración es esencial para eliminar la coagulación de huecos macroscópicos. Una simulación Monte Carlo de la difusión de pares impureza-vacante en un sólido cristalino se ha tratado en anteriores trabajos [16]. Se ha encontrado, que la migración en unión de vacantes y átomos solutos requiere la energía de activación  $E_s$  de átomo soluto que debe ser mas pequeña que un cierto valor umbral, el cual depende de una energía  $E_m$  dentro de la matriz de átomos y de la fuerza de enlace  $E_B$  entre las vacantes y los átomos solutos.

En términos generales implica la transición de la microelectrónica hacia la nanoelectrónica en base a semiconductores y a un nivel molecular completamente nuevo con respecto a la tecnología y descripción física. Los alambres moleculares a nivel nanoescala pueden tener diámetros de 5-10 Angstroms y anchos de 2-20 nanómetros. Estos deben poseer estados apropiados para intercambiar electrones con niveles de energía en electrodos o moléculas en donde ellos funcionan.

### **3. Alambres de escala molecular**

La nanotecnología molecular nos proporciona los prospectos más prometedores para la generación de nuevas tecnologías de interconexión. [17]. Estas consisten en la habilidad de componer bloques individuales de construcción que se interconectan a nivel molecular, átomo por átomo, formando una funcionalidad electrónica completamente controlada. La probabilidad de esquemas de interconexión paralela se basa en fenómenos cuanticomecánicos en una nanoingeniería atómica y molecular. La cuestión de cómo moléculas complejas pueden conducir electricidad implica medir la conductividad eléctrica en una molécula simple. En términos técnicos esto significa que se tiene que conectar una fuente de corriente macroscópica y un multímetro en los límites de tal molécula. La interfase entre la molécula y el metal adquiere una importancia particular. La relación entre la energía de Fermi y las órbitas adyacentes no son el único rol importante, sino también la realización práctica de un contacto eléctrico y mecánicamente estable. También se encuentra en el estado del arte [18-20] los enlaces químicos de la molécula a los contactos metálicos son indispensables para reproducir los resultados de la conductividad eléctrica [21] una característica de corriente voltaje teórica de una molécula simple se ha calculado con la teoría de dispersión [22-23] .



Las formas de las curvas calculadas y medidas concuerdan, así los valores absolutos de corriente se desvían solo en un pequeño factor de 6, si el contacto molécula-metal se establece por una unión química. La facilidad de la transferencia de electrones dentro de una molécula determina actos complejos como un conductor metálico semiconductor o aislante los cuales son altamente significantes para aplicaciones de electrónica molecular.

Así, la transferencia completa de carga como en los metales orgánicos supramoleculares se ha convertido en un tema de investigación con objeto de describir las estructuras geométricas y electrónicas, así como las razones de transferencia de electrones que dependen de parámetros externos. El diseño y síntesis de los requerimientos de donadores p-electrón constituyen un área activa de la química de los materiales modernos.

Una importante familia con estas propiedades se basa en naftoliminas que se sabe forman sales eléctricamente conductivas con una variedad de moléculasceptoras orgánicas como tetracyano-p-quinodimethane (TCNQ), figura 3.

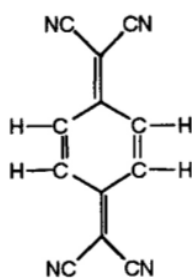


Figura 3a: TCNQ

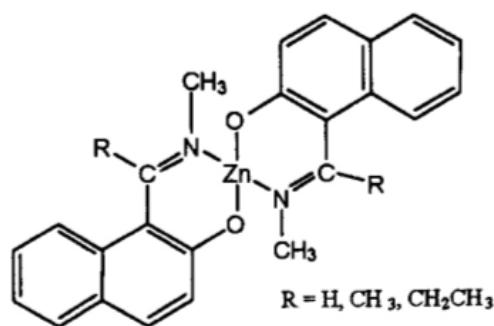


Figura 3b: Zn [RNAFIN]<sub>2</sub>

#### 4. Nanoalambres biomoleculares

Las biomoléculas tienen una ventaja obvia en términos de la producción de estructuras complejas, obedeciendo a sus propiedades de auto ensamblaje en una solución acuosa a temperatura ambiente. La integración de conceptos básicos biológicos a la nanotecnología no solo beneficia la investigación en nanobiosistemas sino que puede ser indispensable para los sistemas nanobioelectrónicos. Se ha ido mostrando que esto es posible para el diseño de sofisticadas arquitecturas computacionales. Esto se logra con materiales biológicos nanoscópicos, éste proceso de información se puede construir y no se requiere de un proceso difícil como en la computación digital tradicional. Como se muestra en la figura 1, la química y la biología determinarán la dirección que tomará la nanotecnología molecular de dispositivos, principalmente por que no existe otra forma de hacerlo. El área activa de investigación relevante en nanobioelectrónica es la estructuración de componentes activos biológicamente, como el ADN, enzimas, anticuerpos, etc. El uso del ADN como un alambre [34] sugiere la posibilidad de alambrar nanocircuitos de dos o tres dimensiones.

En el presente, los sistemas moleculares están recibiendo una gran atención debido a sus propiedades estructurales y electrónicas, así como también a su capacidad de formar una gran variedad de estructuras autoensambladas [35]. Las secuencias de ADN de guanino muestran una eficiente transferencia de carga electrónica [36]. Un reto más grande para los nanobiosistemas consiste en la habilidad de formar tales estructuras y arquitecturas basadas en el auto ensamble de moléculas derivadas biológicamente. Se necesitan modelos para diseñar estos componentes, que pueden surgir juntos de una sola forma.

## 5. Conclusiones

La nanotecnología molecular involucra la habilidad para manipular átomos individuales y moléculas, y por medio de esto se tiene el potencial de brincar a la siguiente revolución tecnológica. El manejo de tecnología microelectrónica moderna durante los últimos 45 años para producir dispositivos más pequeños finalmente entra a una región de un tamaño característico, en donde los límites del desempeño físico demandan una nueva forma de electrónica en donde las moléculas sustituyen a los transistores de estado sólido.

Uno de estos límites se crea por el transporte destructivo de masa debido a la electromigración en los alambres metálicos, que interconectan dispositivos en un chip metálico, y la enorme cantidad de calor causada por la extremadamente alta densidad de carga involucrada. El enfoque químico que se propone para seleccionar una matriz de aleación de átomos basados en los electrones de valencia, puede disminuir la realización concerniente a los nanoalambres metálicos.

Por otro lado soluciones no tecnológicas para conectar grandes cantidades de dispositivos moleculares son aparentes. Mientras que el auto ensamble es el objetivo final, será necesario por lo menos al principio la combinación de métodos de auto ensamble con métodos de fabricación (litografía), los cuales son bien conocidos por la microelectrónica. Lo más probable será que las tecnologías de silicio y electrónica molecular se desarrollen en paralelo durante la siguiente década. El entendimiento de los procesos físicos de carga y transporte de masa a través de nanoalambres metálicos así como de alambres moleculares complejos es imperativa.

## Referencias

- [1] The International Technology Roadmap for Semiconductors, Semiconductor Industry Association, Santa Clara, California, 1999
- [2] A. Avriam, M. Ratner, *Molecular Electronics: Science and Technology*, Ann. N. Y. Acad. Sci. vol. 852, 1998
- [3] N.A. Gershenfeld, I. L. Chuang, *Science*, 275 (1997) 350 D; Bautista, A. Zehe, 11 Foresight Conf.S-Fco 2003.
- [4] Natelson, *Phys. Rev. Lett.* 86 (2001) 1821
- [5] V. T. Srikar, C. V. Thompson, *Appl. Phys. Lett.* 74 (1999) 37
- [6] H.H. Solak, G.F. Lorusso, S.S. Gasson, F. Cerrina, *Appl. Phys. Lett.* 74 (1999)

- [7] A. Neidhardt, G. Krautheim, U. Reinhold, A. Zehe, *Cryst. Res. Technol.* 14 (1979) 179
- [8] A. Zehe, *Materials Lett.* 57(2003)3729
- [9] H. Niwa, S. Teramac, M. Kato, *Appl. Phys. Lett.* 63 (1993) 203
- [10] H. Patil, *HB Hungtington*, 31 (1970) 463
- [11] S. Luby, P. Lobotka, V. Bezak, *phys. status sol (a)*, 60 (1980) 539
- [12] K. Iyakutti, J.L. Calais, A.H. Kai Tang, *J. Phys. F: Met. Phys.* 13 (1983) 1
- [13] A. Zehe, G. Röpke, *J. Phys. F: Metal Phys.* 16 (1986) 407
- [14] C.A. Stafford, D Beariswyl, J. BOrki, *Phys. Rev. Lett.* 79 (1998) 2863
- [15] P. Ziesche, G. Lehmann. *Ergebnisse in der Elektronentheorie derMetalle*, p. 440, Akad. Verlag, Berlin 1983
- [16] B. Fritzsche, R Fritzsche, A. Zehe, *phys. stat sol (b)* 156 (1989) 87, *Cryst. Res. Technol.* 29 (1994) 883
- [17] [Http://www.moletronica.buap.mx](http://www.moletronica.buap.mx)
- [18] D. Porath, *Nature* 403 (2000) 635
- [19] H. Fink, *Nature* 398 (1999) 407
- [20] K.A. Son, *Phys. Rev. Lett.* 86 (2001) 5357
- [21] X.D. Cui, A. Primak, *Science* 294 (2001) 571
- [22] V. Mujica., *J. Chem. Phys.* 112 (2000) 6834
- [23] A.A. Domkov, *Phys. Rev. B* 52 (1995) 1618
- [24] J.S. Miller. *Extended Linear Chain Compounds*, Plenum Press, New York 1983  
J.R. Ferraro, J.M. Williams: *Introduction to Synthetic Electrical Conductors*, Academic Press, San Diego 1987
- [25] S.L. Schiavo, G. Tresoldi, A.M. Mezzasalma, *Inorganica Chimica Acta* 254 (1997) 251
- [26] P.G. Lacroix, S. Dibella, I. Ledoux, *Chemistry ofMaterials* 8 (1996) 541
- [27] V.I. Tsaryuk, V.F. Zolin, V.A. Kudryasova, *Synthetic Metals* 91 (1997) 357
- [28] A. Chakravorty, R.H. Holm, *Inorg. Chem.* 3 (1964) 1010
- [29] J.S. Chapell, A.N. Bloch, W.A. Bryden, M. Maxfield, T.O. Poehler, D.O. Cowan, *J. Amer. Chem. Soc.* 103 (1981) 2442
- [30] R.S. Mulliken. W.B. Pearson: *Molecular Complexes*. Academic Press, NewYork 1969
- [31] E. Kampar, O. Neilands: *Russian Chemical Reviews* 55 (1996) 334
- [32] M. Baitoul, J.P. Buisson, B. Dulieu, J. Wery, O. Chauvet, S. Lefrant, *J. Chim. Phys.* 95 (1998) 1311
- [33] S. Kuroda, K. Marwnoto, N.C. Greenham, R.H. Friend, Y. Shimoi, S. Abe, *Synthetic Metals* 119 (2001) 655
- [34] E. Braun, Y. Eichen, u. Sivan, G. Ben-Yoseph, *Nature* 391 (1998) 775
- [35] A. Calzolari, R. Di Felice, E. Molinari, A. Garbesi, *Appl. Phys. Lett.* 80 (2002) 3331
- [36] M. Bixon, B. Giese, S. Wessely, T. Langenbacher, M. Michel, J. Jortner, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 96 (1999) 11713.