

# **NOCIONES DE NANOELECTRÓNICA**

**Autores:    Ing. Alberto Hernández Pérez, Profesor Titular**

**Lic. María Luisa Corona Herrera, Profesora Auxiliar**

**Centro de Investigaciones en Microelectrónica**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**CUJAE**

**2008**

Todo futuro es fabuloso.<sup>1</sup>

## Contenido

Nota introductoria	4
Introducción	5
Partícula confinada en una caja de paredes infinitas	9
Función de Fermi-Dirac	11
Nivel de Fermi en un semiconductor	12
Heterounión, barrera túnel, pozos, alambres y puntos cuánticos	14
Banda de energía prohibida de algunos semiconductores	15
Dispositivos Nanoelectrónicos	15
¿Qué es la nanoelectrónica?	16
¿Qué avances científicos y tecnológicos han permitido el surgimiento de la nanotecnología?	16
Diodo túnel de Esaki	16
¿Cuántos tipos de dispositivos nanoelectrónicos existen?	19
Dispositivos de efecto cuántico y de un solo electrón de estado sólido	20
Diodo túnel resonante de estado sólido (RTD)	20
Transistor túnel resonante de estado sólido (RTT)	24
Puntos cuánticos ( <i>Quantum Dots</i> ).	25
Transistor de un solo electrón	26
Electrónica molecular	27
Dispositivos de conmutación moleculares activados por luz.	29
Dispositivos moleculares electroquímicos.	29
Dispositivos moleculares electromecánicos.	29
Dispositivos de conmutación electrónicos moleculares controlados por campo eléctrico	29
Diodo molecular rectificador	30
Diodo molecular túnel resonante	34

---

<sup>1</sup> A. Carpentier, Concierto Barroco, Siglo Veintiuno Editores SA, 1974.

Transistor de efecto de campo con nanotubo de carbón	37
Electrónica orgánica. Dieléctricos y semiconductores orgánicos	39
Transistores orgánicos de efecto de campo	40
Diodos orgánicos emisores de luz	40
Otras aplicaciones de los dispositivos orgánicos	40
Dispositivos del tipo uniones túnel magnéticas	41
<b>Referencias</b>	43
<b>Anexo 1. Teoría del escalado</b>	44
<b>Anexo 2. Algunos aspectos de Química Orgánica</b>	47

## **Nota introductoria**

A partir de la invención del transistor (1948) y el posterior desarrollo de los circuitos integrados (1959), la Electrónica se ha caracterizado por su desarrollo sostenido lo que ha permitido la producción de sistemas digitales cada vez mas eficientes y con mayores prestaciones sin aumentar sus precios e incluso reduciéndolos; un buen ejemplo son las computadoras personales. Esto ha podido lograrse gracias a la constante miniaturización de los dispositivos que constituyen los circuitos integrados microelectrónicos.

En la primera década del siglo XXI, la tecnología de la microelectrónica sobrepasó la frontera de los 100 nanómetros. Por debajo de los 100 nanómetros se hacen evidentes los fenómenos cuánticos que determinan que los modelos para explicar el comportamiento de los dispositivos electrónicos tengan que basarse en las leyes de la Mecánica Cuántica en lugar de los modelos de la Física Clásica utilizados en la Microelectrónica; esto, conjuntamente con otras razones de tipo tecnológico y económico lleva al surgimiento de una nueva etapa en el desarrollo de la Electrónica basada en la Nanoelectrónica, la que se espera pasará o ocupará el papel protagónico en la fabricación de computadoras y en otras aplicaciones en los próximos años.

De lo anterior se concluye que es necesario la inclusión de aspectos relacionados con la Nanoelectrónica en la preparación de los ingenieros tales como el estudio de algunos de los dispositivos nanoelectrónicos básicos así como varios ejemplos de sus posibles aplicaciones en el diseño de circuitos lógicos.

Dada la carencia de un material de texto adecuado para el logro de este objetivo, los autores realizaron una revisión bibliográfica amplia y, a partir de ella, escribieron una breve Introducción a la Nanoelectrónica a comienzos del 2003. Este material está disponible, desde entonces, en formato electrónico para los estudiantes de la CUJAE. Basado en ese material y las necesidades que plantea el Plan de Estudios D, que comenzó a impartirse desde el curso 2006-2007, se ha realizado la preparación de estas Nociones de Nanoelectrónica que constituye una actualización y ampliación del contenido presentado en Introducción a la Nanoelectrónica.

## Introducción

La Microelectrónica comenzó su desarrollo en 1960 con el invento de la tecnología planar. Desde entonces se ha producido un desarrollo impresionante de los circuitos integrados que ha permitido que la cantidad de transistores por unidad de área en el “chip” de silicio se duplique cada año y medio, aproximadamente, ley de Moore [1]. La consecuencia inmediata de la ley de Moore es evidente; entre otras, pueden señalarse el desarrollo de nuevas aplicaciones que abarcan todas las esferas de la actividad humana. Dado que la capacidad de las memorias de estado sólido es proporcional al número de dispositivos que contienen, se infiere de la ley de Moore que éstas duplican su capacidad cada 1,5 años permitiendo así la aparición de computadoras mas potentes y otros sistemas digitales que duplican sus prestaciones cada uno o dos años, como se ilustra en la Figura 1:

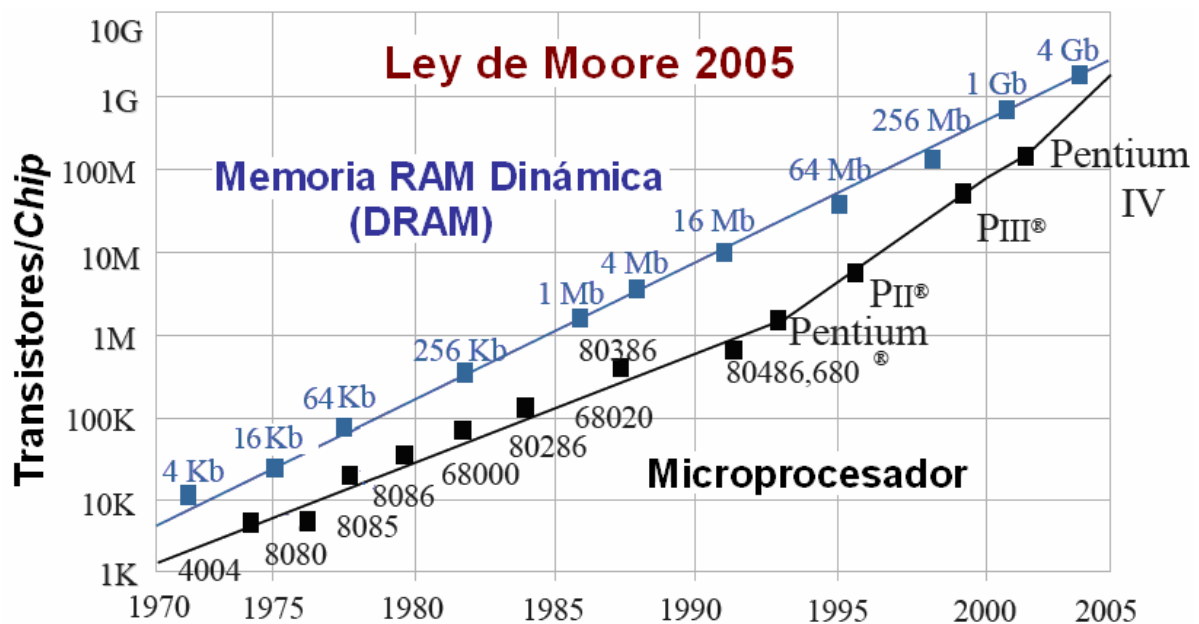


Figura 1. Evolución de las memorias DRAM, de los procesadores y del número de transistores en un “chip” entre los años 1970 y 2005.

Ahora debemos hacernos la siguiente pregunta, ¿cómo es posible duplicar la cantidad de transistores por unidad de área en el “chip” de silicio cada año y medio, aproximadamente?

La respuesta es evidente disminuyendo el tamaño de los dispositivos y el área destinada a la interconexión de los mismos. En la Tabla 1 se muestra la disminución de las reglas de diseño de los circuitos integrados en el período 1970-2007.

Tabla 1. Disminución de las reglas de diseño de los circuitos integrados en el período 1970-2007

Año	Regla de Diseño ( $\mu\text{m}$ )	Año	Regla de Diseño ( $\mu\text{m}$ )
1970	10,00	1995	0,30
1975	5,50	1998	0,18
1980	2,50	2001	0,13
1985	1,30	2003	0,090
1990	0,60	2005	0,065
1993	0,40	2007	0,045

La disminución continua de las reglas de diseño de los circuitos integrados permitió alcanzar dimensiones por debajo de  $0,1\mu\text{m}$  (100nm) en el 2003. En esta escala de trabajo se presentan dificultades tecnológicas cada vez más difíciles de resolver para la tecnología microelectrónica (Vea Anexo 1), lo que sólo ha podido lograrse mediante cambios en los procesos tecnológicos tales como nuevos procesos fotolitográficos, la utilización del cobre en lugar del aluminio para realizar la interconexión de los dispositivos dentro del “chip” y otros. Todo ello ha incrementado notablemente el costo de fabricación de las máscaras y de las plantas industriales destinadas a la producción de los circuitos integrados. La llamada segunda ley de Moore, que se muestra en la Figura 2, caracteriza esta tendencia.

## Segunda ley de Moore

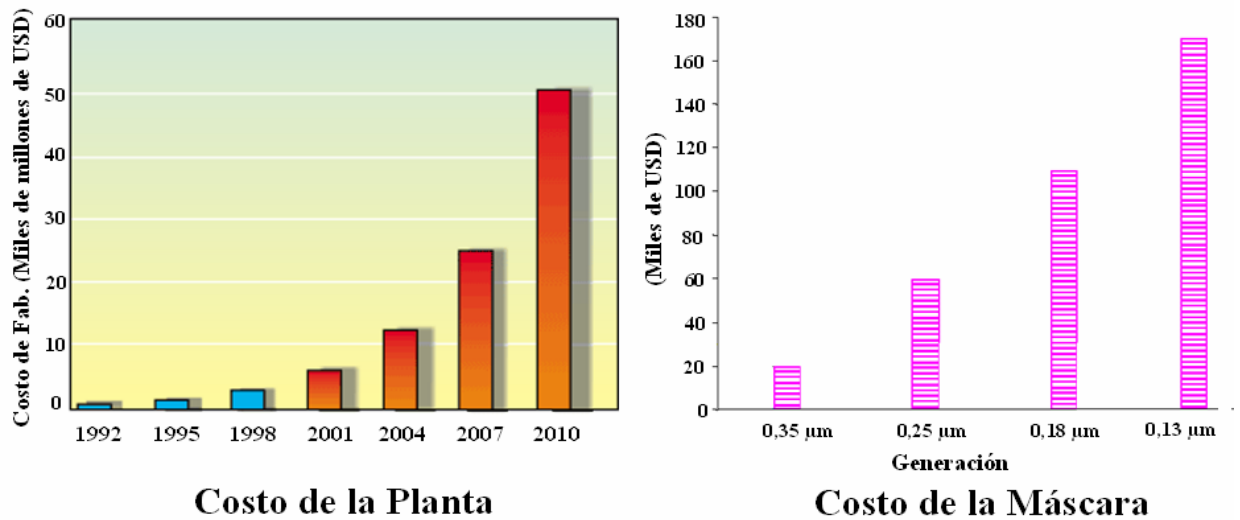


Figura 2. Segunda ley de Moore.

### Area destinada a la interconexión de los circuitos integrados

El número de transistores en un *chip* se ha incrementado desde algunos miles al comienzo de los años 70 hasta mil millones en el 2007. Lo anterior trae aparejado grandes problemas para la interconexión de los dispositivos pues, además de la reducción del área destinada a la misma, a cercanía de los transistores hace muy difícil su aislamiento debido a los efectos capacitivos. Una alternativa para solucionar esta dificultad es utilizar una arquitectura diferente en el *chip*, tal como la arquitectura llamada autómata celular [2]. En este tipo de arquitectura cada celda sólo interactúa con sus vecinas lo cual puede lograrse, entre otros medios físicos, mediante los efectos capacitivos lo que posibilita la eliminación de “cables” para la interconexión. En la Figura 3 se muestra este tipo de arquitectura para el caso bidimensional.

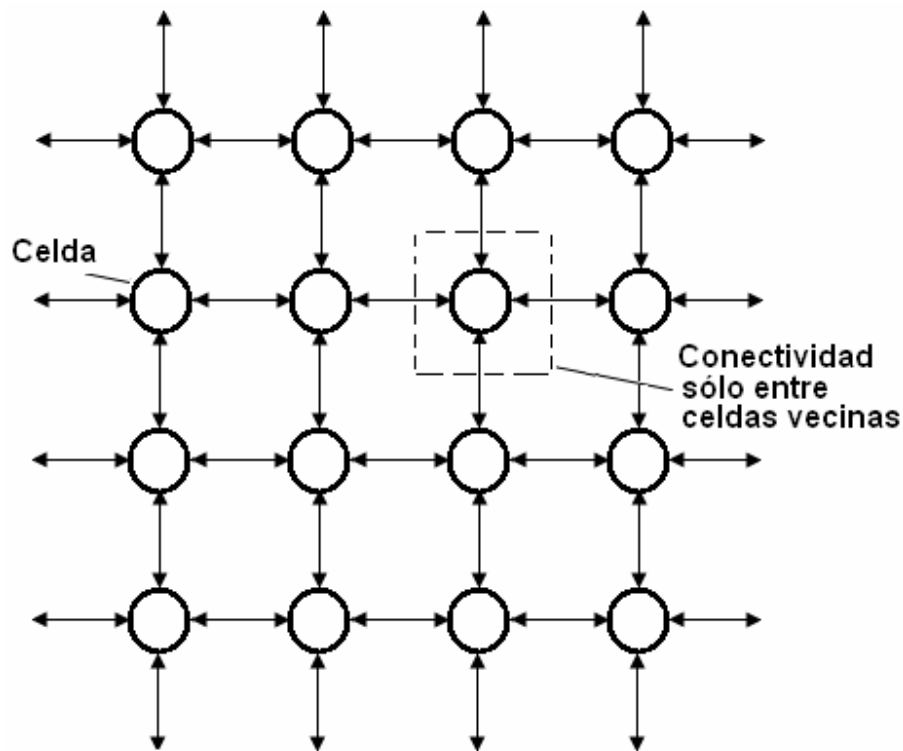


Figura 3. Arquitectura bidimensional del autómata celular

La arquitectura del autómata celular permite realizar cualquier función lógica, en general, empleando un número mayor de transistores que las arquitecturas actuales. Esto no constituiría una limitación para los circuitos integrados nanoelectrónicos ya que en estos se aspira alcanzar cifras del orden del millón de millones de transistores ( $10^{12}$ ).

Un procesador que utilice este tipo de arquitectura sería muy diferente al conocido procesador *Princeton (Von Neumann)*, el cual está dividido en bloques cuyos elementos pueden comunicarse con otros situados lejos de ellos.

Además, en la escala nanométrica se hacen patentes los fenómenos cuánticos que implican el establecimiento de nuevos modelos para comprender y explicar el funcionamiento de los dispositivos, lo que se había estado realizando, hasta el presente, con los modelos basados en las leyes de la Física clásica. Se produce aquí un salto cualitativo derivado de un fenómeno cuantitativo, la disminución del tamaño de los dispositivos rompiendo la barrera de los 100 nanómetros. (Un



manómetro es aproximadamente 10 radios atómicos). La combinación de los hechos que se acaban de señalar ha llevado a los expertos a vaticinar que la utilización de la tecnología microelectrónica basada en el silicio como material fundamental deberá ceder su lugar a una nueva tecnología, la nanoelectrónica, en la década del 2010-2020.

### **Partícula confinada en una caja de paredes infinitas.**

Como sabemos el carácter ondulatorio de la luz quedó bien establecido en el primer cuarto del siglo XIX, con los experimentos de Fresnel sobre interferencia, difracción y polarización los que vinieron a confirmar la teoría ondulatoria de la luz desarrollada por Huygens en el siglo anterior, en oposición a la naturaleza corpuscular que le atribuía su contemporáneo Newton. Al final del siglo XIX había varios problemas que no tenían explicación en la Física, uno de ellos era el efecto fotoeléctrico cuyas leyes no podían obtenerse a partir de la teoría ondulatoria de la luz. Estas leyes fueron descubiertas por Einstein en 1905, considerando que la radiación luminosa se comporta, en determinadas condiciones, como si estuviera compuesta por un haz de partículas (fotones) cuya energía,  $E$ , está cuantizada y viene dada por  $E = hf$  donde  $h$  es la constante de Planck ( $h = 6,626 \times 10^{-34}$  J-s.) y  $f$  es la frecuencia de oscilación cuando se considera la luz como onda. Se llegaba así al establecimiento de la naturaleza dual onda-partícula de la luz, la cual se extendería a toda la materia en 1924, cuando Louis De Broglie descubrió la naturaleza ondulatoria de los electrones y estableció que una partícula con cantidad de movimiento  $p = mv$ , tiene una longitud de onda asociada dada por la ecuación  $\lambda = h/p$ . La ecuación anterior, conocida como relación de De Broglie, fue confirmada en los experimentos realizados por Davisson-Germer. Se sugiere al lector el cálculo de la longitud de onda asociada con diferentes partículas, por ejemplo un electrón que se mueva con una velocidad de  $5,9 \times 10^6$  m/s y una pelota de béisbol, con una masa aproximada de 150 g, lanzada con una velocidad de 90 millas/hora.

A partir del reconocimiento dual onda-partícula de la materia se desarrolló un nuevo planteamiento, llamado mecánica cuántica, que permitía explicar

numerosos problemas insolubles para la física clásica. Correspondió a Erwin Schrödinger, entre otros, dar forma matemática a estas nuevas concepciones por lo que la ecuación fundamental de la mecánica cuántica lleva su nombre.

Supongamos que tenemos una partícula confinada dentro de una caja de paredes infinitamente altas, como la mostrada en la Figura 4, resolviendo la ecuación de Schrödinger para las condiciones de frontera correspondientes a este caso se encuentra que la longitud de onda asociada a la partícula estará dada por la ecuación  $\lambda = 2L/n$ , donde  $n=1, 2, 3, \dots$ , por consiguiente, de acuerdo con la relación de De Broglie, su cantidad de movimiento será  $p = h/\lambda = nh/2L$  y su energía,  $E$ , estará dada por la ecuación  $E = p^2/2m = n^2h^2/8mL^2$ .

De las ecuaciones anteriores se concluye que, dada la naturaleza ondulatoria de la partícula, su cantidad de movimiento y su energía están cuantizados. Cuanto menor es  $L$  mayor será la energía de la partícula confinada.

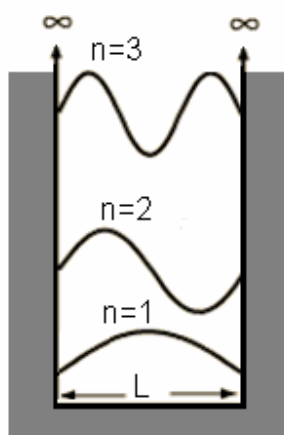


Figura 4. Partícula confinada en una caja de paredes infinitas.

Ejemplo:

Si  $L = 0,4 \text{ nm}$  y la partícula confinada es un electrón. Calcule la cantidad de movimiento y la energía para los números cuánticos  $n=1$  y  $n=2$ .

Solución:

La constante de Planck es  $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J-s}$ .

La masa del electrón es  $m = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ,  $p = nh/2L$ ,  $E = p^2/2m$

Sustituyendo los valores numéricos, tenemos

$$p_1 = h/2L = (6,626 \times 10^{-34} \text{ J-s}) / (2 \times 0,4 \times 10^{-9} \text{ m}) = 0,83 \times 10^{-24} \text{ kg m/s}$$

$$p_2 = 2h/2L = 2p_1 = 2 \times 0,83 \times 10^{-10} = 1,66 \times 10^{-24} \text{ kg m/s}$$

$$E_1 = p_1^2/2m = (0,83 \times 10^{-24} \text{ kg m/s})^2/(2 \times 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}) = 0,0378 \times 10^{-17} \text{ J}$$

$$= 2,36 \text{ eV.}$$

Recordemos que  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ .

$$E_2 = 4E_1 = 9,44 \text{ eV.}$$

### Función de Fermi-Dirac [3]

La función de Fermi-Dirac,  $f(E)$ , nos da la probabilidad de que un estado con energía  $E$ , esté ocupado por un electrón, en condiciones de equilibrio térmico. Su expresión matemática es la siguiente:

$$f(E) = 1/(1 + e^{(E - E_F)/kT})$$

donde,

$E_F$  es la energía correspondiente al nivel de Fermi, eV.

$k$  es la constante de Boltzmann,  $k = 8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/}^\circ\text{K}$ .

$T$  es la temperatura,  $^\circ\text{K}$

En los cálculos numéricos relacionados con la función de Fermi-Dirac se acostumbra, por comodidad, expresar las unidades de energía en electrón-Volt. Analicemos la ecuación anterior para las condiciones siguientes:

$$\begin{aligned} \text{a) si } T = 0^\circ\text{K} \quad f(E) &= 1 \quad \text{para } E < E_F \\ f(E) &= 0 \quad \text{para } E > E_F \end{aligned}$$

De la última condición se concluye que el nivel de Fermi es la energía máxima que puede tener un electrón a la temperatura de  $0^\circ\text{K}$ .

$$\begin{aligned} \text{b) si } T > 0^\circ\text{K} \quad f(E) &> 0,5 \quad \text{para } E < E_F \\ f(E) &< 0,5 \quad \text{para } E > E_F \quad \text{y} \\ f(E) &= 0,5 \quad \text{para } E = E_F \end{aligned}$$

De la última condición se puede afirmar que el nivel de Fermi (para  $T > 0^\circ\text{K}$ ) representa el nivel de energía cuya probabilidad de estar ocupado por un electrón es de un 50 %, siempre que no exista una banda prohibida.

Los resultados anteriores se resumen en el siguiente gráfico:

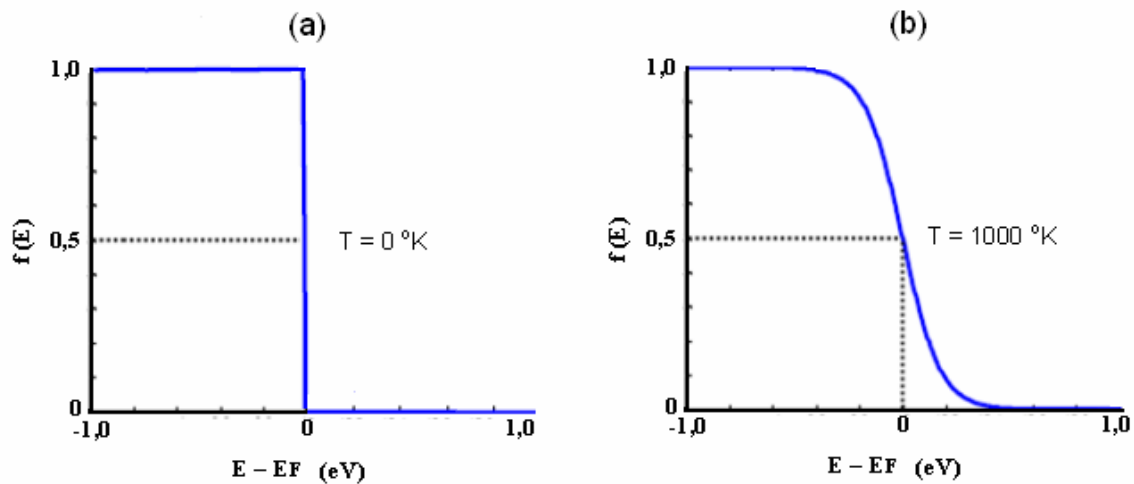


Figura 5. Función de distribución de Fermi\_Dirac, (a) Temperatura 0 °K, (b) Temperatura 1000 °K.

### Nivel de Fermi en un semiconductor

En un semiconductor, la concentración de electrones en la banda de conducción está dada por la ecuación siguiente:

$$n = N_C e^{-(E_C - E_F)/kT}$$

Mientras que la concentración de huecos en la banda de valencia está dada por la ecuación:

$$p = N_V e^{(E_V - E_F)/kT}$$

A partir de las ecuaciones anteriores se puede encontrar las expresiones para el nivel de Fermi, tanto en un semiconductor intrínseco, como en uno extrínseco.

#### a) Nivel de Fermi en un semiconductor intrínseco:

Para un semiconductor intrínseco  $n = p$ , por tanto

$$N_C e^{-(E_C - E_F)/kT} = N_V e^{(E_V - E_F)/kT}$$

Tomando logaritmos y despejando, se encuentra que

$$E_F = (E_C + E_V)/2 - (kT/2) \ln (N_C/N_V)$$

donde,

$E_C$  es el nivel de energía mínimo correspondiente a la banda de conducción,

$E_V$  es el nivel de energía máximo correspondiente a la banda de valencia,

$$N_C/N_V = (m_n / m_p)^{3/2}$$

donde  $m_n$  y  $m_p$  son la masa efectiva del electrón y del hueco, respectivamente.

Si suponemos que  $m_n = m_p$  tenemos que  $N_C = N_V$  y por consiguiente

$$E_F = (E_C + E_V)/2$$

O sea, en un semiconductor intrínseco el nivel de Fermi se encuentra en la mitad de la banda prohibida

**b) Nivel de Fermi en un semiconductor con impurezas:**

En un semiconductor con impurezas donoras, la concentración de electrones en la banda de conducción está dada, aproximadamente, por:

$$N_D = n = N_C e^{-(E_C - E_F)/kT}$$

Donde  $N_D$  es la concentración de impurezas donoras.

Tomando logaritmos en la ecuación anterior y despejando, se obtiene el nivel de Fermi en un semiconductor tipo n, como:

$$E_F = E_C - kT \ln (N_C/N_D)$$

En la posición relativa del nivel de  $E_F$  y  $E_C$ , hay tres posibilidades

$$\text{Si } N_D = N_C, \quad E_F = E_C$$

Si  $N_D > N_C$ ,  $E_F > E_C$ , el nivel de Fermi cae dentro de la banda de conducción. Este resultado es importante para comprender el funcionamiento de los dispositivos de tipo túnel.

Si  $N_D < N_C$ ,  $E_F < E_C$ , el nivel de Fermi está dentro de la banda prohibida, como ocurre generalmente en un dispositivo microelectrónico.

En un semiconductor con una concentración,  $N_A$ , de impurezas aceptoras, la concentración de huecos en la banda de valencia está dada aproximadamente por  $N_A = p = N_V e^{(E_V - E_F)/kT}$

Tomando logaritmos y despejando en la ecuación anterior, encontramos que el nivel de Fermi en un semiconductor tipo p está dado por:

$$E_F = E_V + kT \ln (N_V/N_A)$$

En la posición relativa del nivel de  $E_F$  y  $E_V$ , hay tres posibilidades

$$\text{Si } N_A = N_V, \quad E_F = E_V$$

Si  $N_A > N_V$ ,  $E_F < E_V$ , el nivel de Fermi cae dentro de la banda de valencia. Este resultado es importante para comprender el funcionamiento de los dispositivos de tipo túnel.

Si  $N_A < N_D$ ,  $E_F > E_V$ , el nivel de Fermi está dentro de la banda prohibida, como ocurre generalmente en un dispositivo microelectrónico.

### **Heterounión, barrera túnel, pozos, alambres y puntos cuánticos.**

Una heterounión está formada por dos materiales semiconductores diferentes, la diferencia en los valores de energía en su banda prohibida provoca la aparición de discontinuidades en las bandas de energía en la heterointerfase. La utilidad de la heterounión está dada por la posibilidad que brinda de controlar los estados y el movimiento de los electrones y huecos en los semiconductores.

Un pozo cuántico es un pozo de potencial que confina las partículas en un plano. Este confinamiento ocurre cuando la tercera dimensión, el espesor, del pozo cuántico es comparable con la longitud de onda establecida por De Broglie para una partícula. La energía de los electrones y huecos en un pozo cuántico están, cuantizadas, como ocurre en el caso de una partícula confinada en una caja de paredes infinitas. En un alambre cuántico el confinamiento se produce en dos direcciones, mientras que en un punto cuántico el confinamiento ocurre en tres direcciones, como se aprecia en la Figura 6.

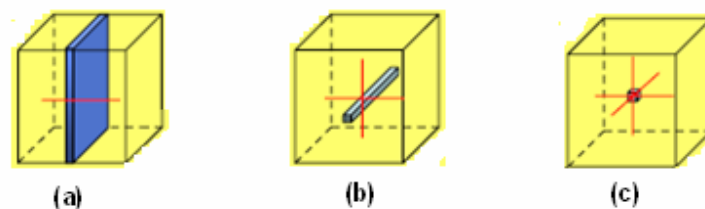


Figura 6. a) Pozo cuántico, b) alambre cuántico, c) punto cuántico.

Los pozos cuánticos ocurren en los semiconductores cuando se tiene un material, como el arseniuro de galio, entre dos capas de un material que tenga una banda de energía prohibida mayor, por ejemplo, arseniuro de aluminio (vea Tabla 2). Cuando ocurre lo contrario se produce una barrera túnel, como se aprecia en la Figura 7.

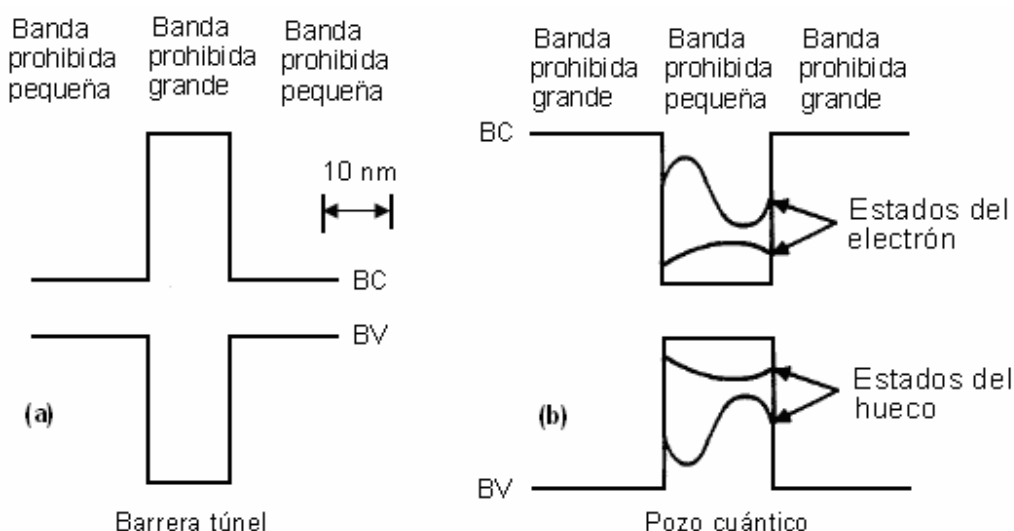


Figura 7. a) Barrera túnel, b) Pozo cuántico.

### Banda de energía prohibida de algunos semiconductores.

Los valores de la banda de energía prohibida ( $E_G$ ) de algunos semiconductores a  $T = 300^\circ \text{ K}$ , se muestran en la Tabla siguiente:

Tabla 2. Banda de energía prohibida de algunos semiconductores ( $T = 300^\circ \text{ K}$ ).

Elemento	Banda de energía prohibida ( $E_G$ ), eV	
Ge	0,72	
Si	1,10	
GaAs	1,42	
AlAs	2,16	
Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As ( $0 < x < 1$ )	Si $x < 0,45$	$E_G = 1,42 + 1,27x \text{ eV.}$
	Si $x > 0,45$	$E_G = 1,90 + 0,25x + 0,143 x^2 \text{ eV}$

### Dispositivos Nanoelectrónicos [4]

En los próximos años la microelectrónica se verá remplazada, paulatinamente, por la nanoelectrónica. Esto es debido a que las nuevas aplicaciones requieren circuitos integrados con mayores prestaciones y, al mismo tiempo, de tamaño más pequeño. Pensemos solamente en la evolución de las aplicaciones y las dimensiones de las computadoras, la telefonía celular entre otras. La obtención del

genoma humano, lo que hace que estemos trabajando dentro de la medicina en escalas de nanómetros, unido a los avances de la informática son, entre otros, los grandes impulsores para el trabajo en nanoelectrónica.

## **¿Qué es la nanoelectrónica?**

Es la Electrónica basada en dispositivos con dimensiones de nanómetros. Los dispositivos nanoelectrónicos se basan en la naturaleza cuántica de la conducción eléctrica en la materia; están gobernados por las leyes de la Física Cuántica. Los nanodispositivos son la alternativa a los dispositivos MOS y bipolar clásicos

La nanoelectrónica es una de las ramas actuales de la nanotecnología. La nanotecnología surgió en los años 80 y engloba una amplia serie de técnicas usadas para modificar, caracterizar y controlar la materia a escala a nivel de los átomos y las moléculas. Puede considerarse a *Richard P. Feynman, Premio Nobel de Física en 1965, como el precursor de la nanotecnología debido a sus planteamientos acerca de sus posibilidades e importancia* [5]

## **¿Qué avances científicos y tecnológicos han permitido el surgimiento de la nanotecnología?**

Entre los más importantes, podemos señalar:

- La invención del microscopio de efecto túnel (STM) por G. Binnig y H. Rohrer en 1981.
- El descubrimiento del “fullereno” por R. E. Smalley, H. Croto y R. F. Curl en 1985.
- El descubrimiento de los nanotubos de carbono por S. Iijima en 1991.

El surgimiento de la nanoelectrónica ha sido posible por los avances señalados anteriormente y también por la puesta a punto, en esos años, de tecnologías como la epitaxia de haces moleculares (*MBE*) y la fotolitografía de haces de electrones lo que posibilitó delimitar estructuras nanométricas y la obtención de capas cuasi-monoatómicas de diferentes materiales semiconductores.

### **Diodo túnel de Esaki**

Antes de presentar los dispositivos nanoelectrónicos es conveniente analizar el diodo túnel de Esaki [3] por ser anterior a los mismos y porque su estudio facilita



comprenderlos mejor. Este diodo está constituido por una unión NP semiconductor donde se cumple que  $N_D > N_C$  y  $N_A > N_V$ . Por consiguiente las bandas de energía tienen el aspecto mostrado en las Figuras 8 y 9:

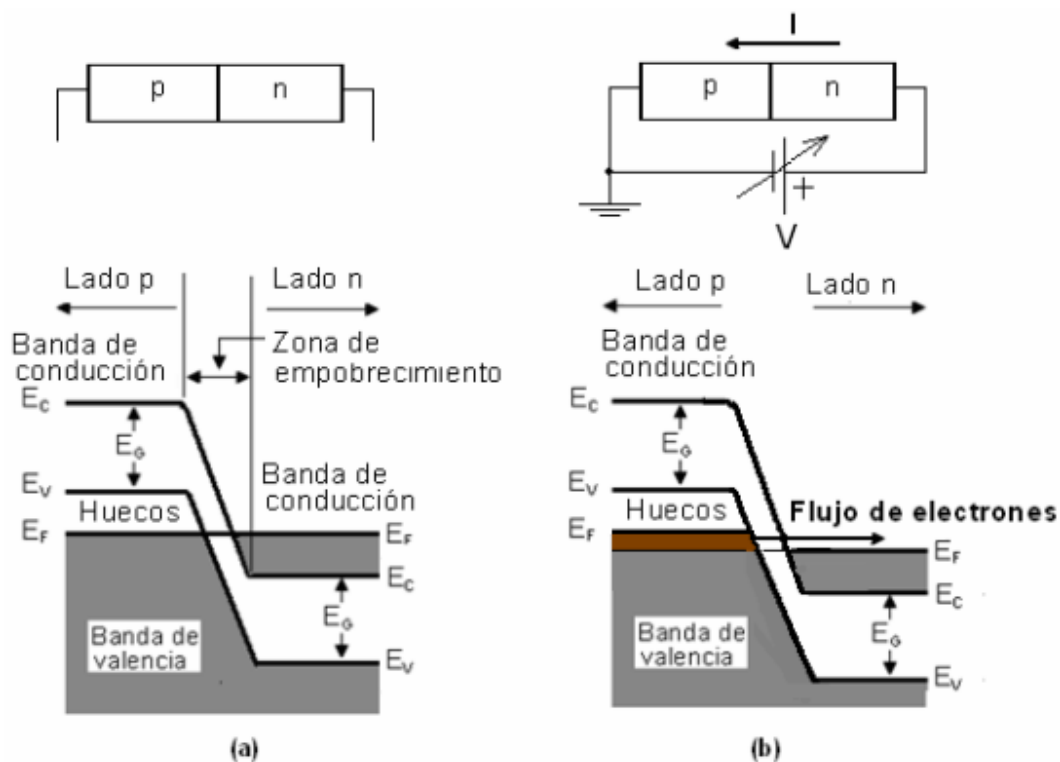


Figura 8. Bandas de energía correspondiente a un diodo túnel de Esaki a temperatura ambiente: (a) No polarizado (b) Con polarización inversa

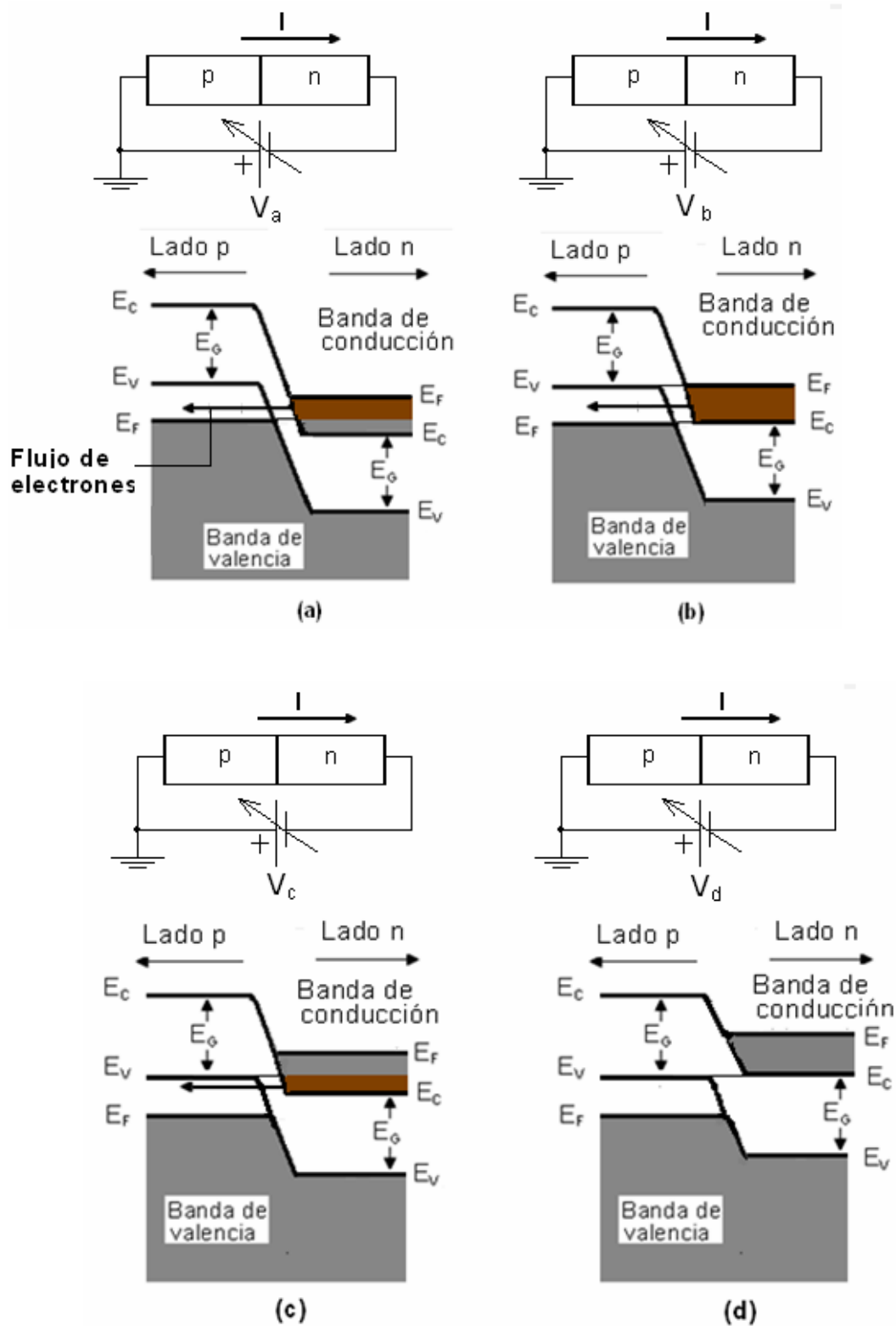


Figura 9. Bandas de energía con el diodo polarizado en directa.

En la Figura 9, el diodo está polarizado en directa y se cumple que  $V_a < V_b < V_c < V_d$ ). La característica  $I$  vs.  $V$  se muestra a continuación:

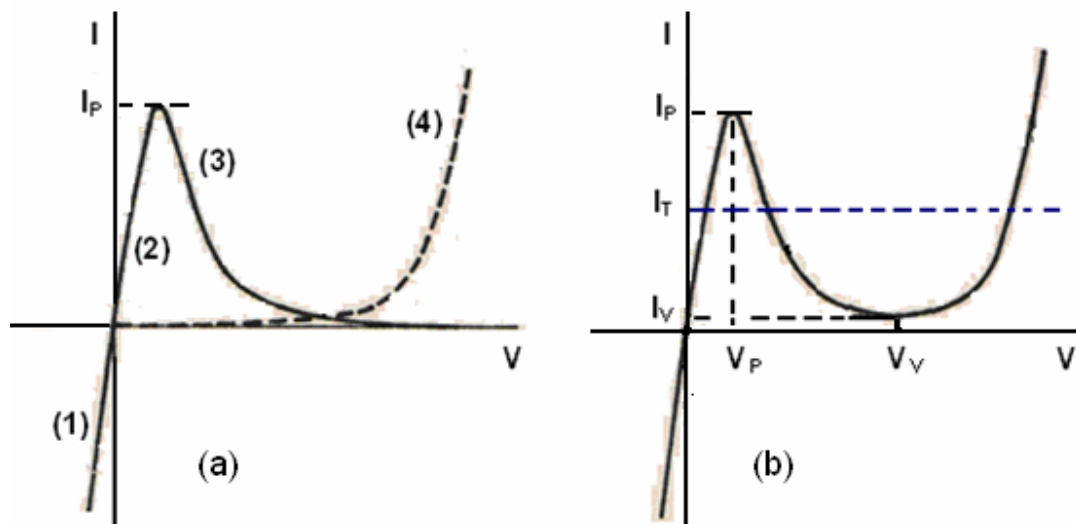


Figura 10. Característica I-V del diodo túnel.

En (a) se muestra en línea continua la corriente debida al efecto túnel y en línea discontinua la corriente de inyección típica de la unión P-N, los números indican las diferentes zonas de trabajo del diodo de acuerdo al tipo y magnitud de la polarización aplicada. En (b) se muestra la corriente resultante.

## ¿Cuántos tipos de dispositivos Nanoelectrónicos existen? [4]

Hay dos tipos:

- a) Dispositivos de efecto cuántico y de un solo electrón de estado sólido. Los dispositivos de efecto cuántico y de un solo electrón de estado sólido aprovechan en su diseño y construcción la experiencia tecnológica de los semiconductores de los últimos 50 años.
- b) Dispositivos electrónicos moleculares. Los dispositivos electrónicos moleculares se basan en materiales y principios de funcionamiento completamente diferentes a los utilizados por la microelectrónica. Representan un cambio radical en los materiales y principios de funcionamiento de los dispositivos electrónicos clásicos.

## Dispositivos de efecto cuántico y de un solo electrón de estado sólido [2-4]

Los materiales más utilizados actualmente para su diseño y construcción son el  $\text{GaAs}$ , el  $\text{AlAs}$  y el  $\text{SiGe}$ . Todos ellos tienen una “isla” semiconductor o de metal donde están confinados los electrones. La composición, forma y dimensiones de la “isla”, definen las características del dispositivo. Diferentes efectos cuánticos rigen el paso de los electrones por la “isla” y, por consiguiente, la corriente que circula en estos dispositivos.

De acuerdo a la confinación a que están sometidos los electrones dentro de la “isla”, existen tres categorías diferentes de dispositivos:

- Dispositivos de efecto túnel resonante
- Puntos cuánticos (*Quantum Dots*).
- Transistor de un solo electrón (Single Electron Transistor).

### Diodo túnel resonante de estado sólido (RTD)

El diodo túnel resonante puede ser molecular, como el presentado en la Figura 18, o de estado sólido como el que se muestra en la Figura 11:

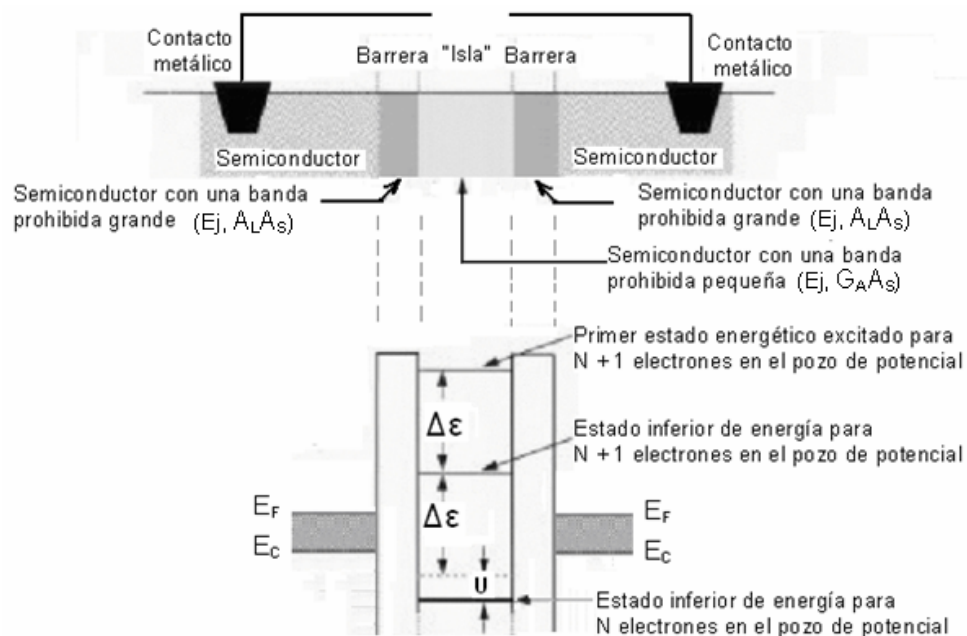


Figura 11. Diodo túnel resonante de estado sólido no polarizado.

En la parte superior se puede apreciar la sección transversal de este diodo y en la parte inferior los niveles de energía que aparecen en las diferentes regiones que constituyen este dispositivo.

En el diodo túnel resonante de estado sólido la “isla” se hace de un material semiconductor que tenga una banda prohibida pequeña, por ejemplo  $GaAs$  y está rodeada por otro tipo de material, por  $AlAs$  que tiene una banda prohibida grande. La “isla” es, generalmente, larga y estrecha, “alambre cuántico”. Su dimensión menor varía entre 5 y 100nm, debido a esto los electrones en la “isla” tienen uno o dos grados de libertad clásicos y sus niveles de energía están cuantificados.

Como se aprecia en la Figura 11, hay un pozo de energía potencial en la región del dispositivo ocupada por la “isla” que, en condiciones de no-polarización externa, impide la entrada y salida de los electrones a la misma

En este dispositivo las regiones de fuente y drenaje son iguales por lo que el nombre de cada una depende de la polaridad de la tensión externa aplicada. Los electrones móviles que están en las regiones de fuente y drenaje ocupan los niveles de energía comprendidos entre el borde de la banda de conducción y el nivel de Fermi. Como sabemos, todos los niveles de energía por encima del nivel de Fermi, a cero grados Kelvin, están desocupados. Cuando en la “isla” hay  $N$  electrones para que pueda entrar otro electrón es necesario vencer la repulsión que los  $N$  electrones existentes ejercerán sobre el  $N + 1$ , esto implica la necesidad de realizar un trabajo equivalente a la energía  $U$  (llamada energía de carga) más  $\Delta\epsilon$  (energía de excitación) tal como se muestra en la Figura 11.

Los valores relativos de  $U$  y  $\Delta\epsilon$  dependen de la forma y el tamaño de la “isla”:

La energía de excitación aumenta al disminuir la dimensión menor de la “isla”. Mientras que la energía de carga es inversamente proporcional a la dimensión mayor de la “isla” ya que es esta dimensión la que permite a los electrones alejarse más entre sí. En los dispositivos resonantes la forma y dimensiones de la “isla” son tales que  $\Delta\epsilon \gg U$ .

Efecto túnel resonante:

Los electrones que ocupan niveles energéticos por debajo de la barrera de energía potencial tienen una probabilidad finita de atravesar dicha barrera siempre

que el espesor de la misma sea suficientemente pequeño (5 a 10 nm o menos, de acuerdo a su altura), no obstante para que un electrón atraviese la barrera es necesario que exista un nivel de energía vacante dentro de la “isla” igual al nivel de energía que tiene el electrón en la región de la fuente. En las condiciones mostradas en la Figura 11 no se cumple esta última condición y, por lo tanto, no se produce el flujo de electrones desde la fuente hacia la “isla”.

Polarizando adecuadamente el dispositivo se puede eliminar la diferencia entre los niveles de energía del electrón dentro de la isla con relación a la fuente, como se muestra en la Figura 12(b) y (d), lo que posibilita el paso de electrones desde la fuente hacia la “isla”. Por otra parte, en la región de drenaje hay una banda de energía semejante a la existente en la fuente, lo que posibilita que los electrones de la “isla” realicen el efecto túnel a través de la barrera de energía potencial que los separa del drenaje ya que en éste hay niveles de energía desocupados de igual valor que los niveles de energía dentro de la “isla”. De todo lo anterior resulta un flujo de electrones desde la fuente hacia el drenaje y, por tanto, la circulación de una corriente eléctrica en sentido contrario.

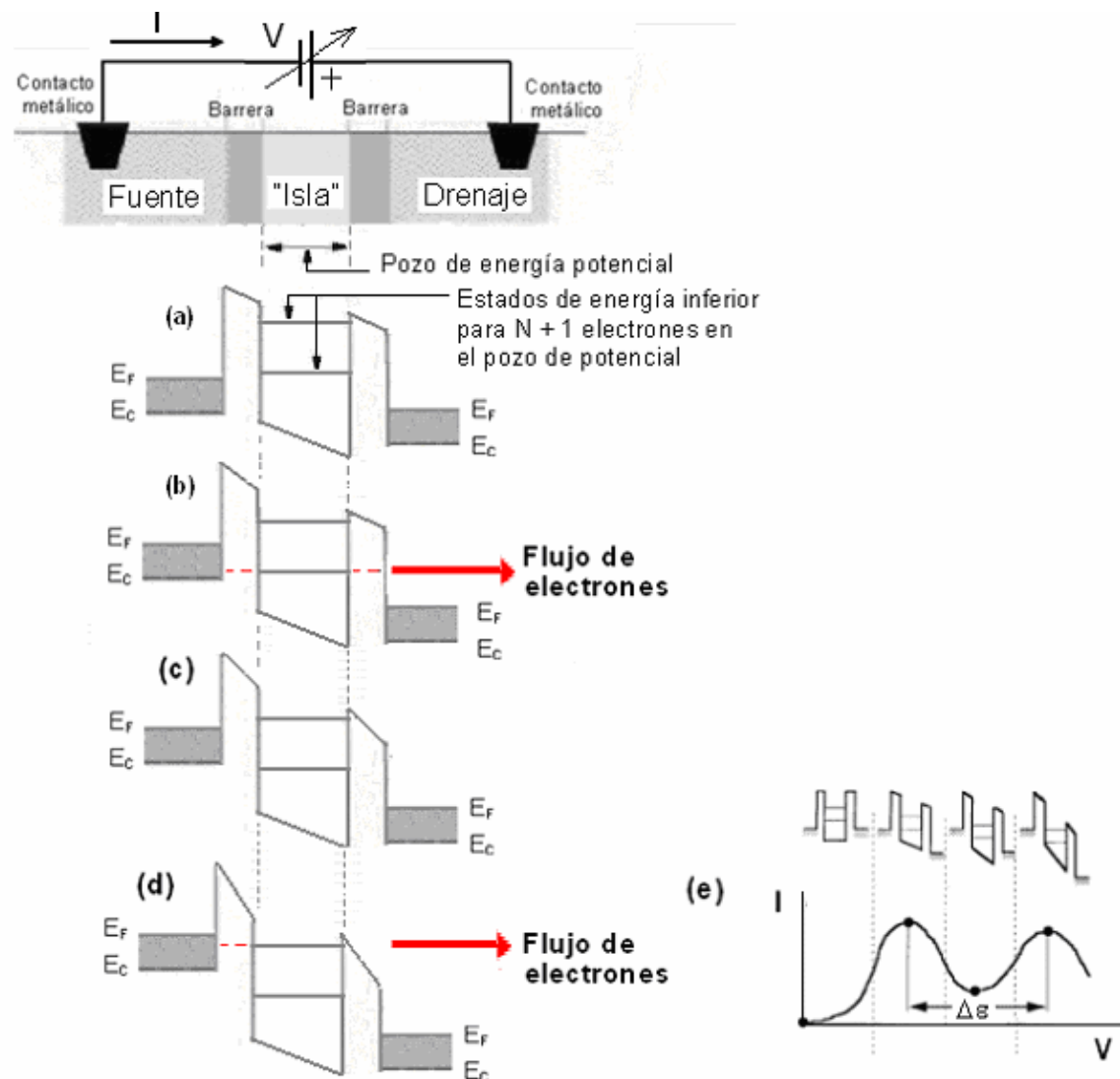


Figura 12. Diodo de efecto túnel resonante de estado sólido

- a) La tensión externa aplicada es insuficiente para producir el efecto túnel resonante a través de la barrera de potencial que separa la fuente de la "isla",
- b) Al aumentar la tensión, se produce efecto túnel resonante con el nivel energético más bajo dentro de la "isla" lo que provoca un pico de corriente en la característica  $I$  vs.  $V$ ,
- c) Si aumentamos aun más la tensión la corriente disminuye hasta alcanzar un mínimo cuando cesa el efecto túnel resonante,

(d) para un nuevo incremento de la tensión de polarización se produce un segundo pico de corriente debido al efecto túnel resonante, esta vez con un nivel de energía mayor dentro de la "isla".

Naturalmente, para que ocurran los picos señalados anteriormente, tiene que cumplirse que  $\Delta\varepsilon > (E_F - E_C)$ .

### Transistor de efecto túnel resonante de estado sólido (RTT).

En la Figura siguiente se muestra un RTT de estado sólido:

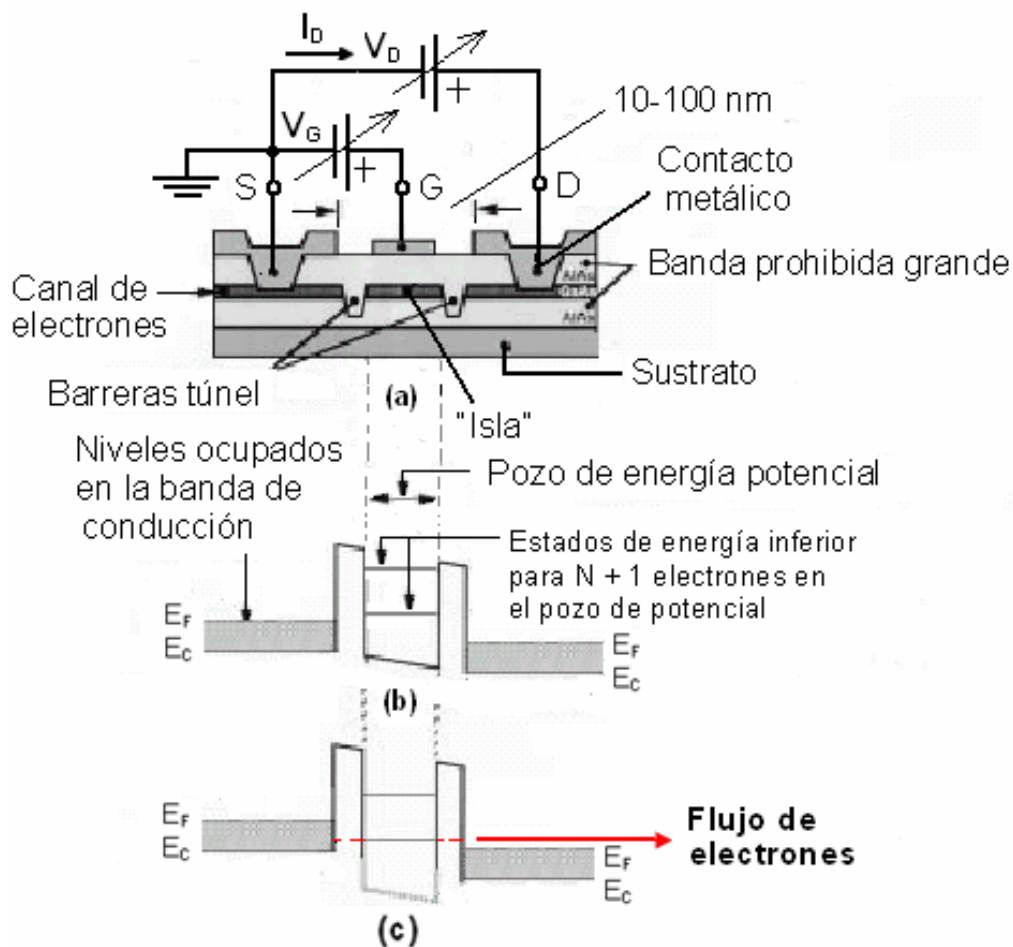


Figura 13. Transistor de efecto túnel resonante (RTT)

a) Sección transversal. b) Barreras y pozo de energía potencial con el transistor cortado. c) Transistor en resonancia.

Los niveles de energía de los electrones en el pozo de potencial pueden variarse también mediante un tercer electrodo (compuerta), lográndose así un transistor resonante de efecto túnel, mostrado en la Figura anterior.



**Puntos cuánticos (*Quantum Dots*).**

En estos dispositivos la “isla” puede ser de metal o semiconductora. Las dimensiones de la “isla” son muy pequeñas, debido a esto los electrones en la “isla” tienen cero grados de libertad clásicos. Tanto la energía de carga,  $U$ , como la de excitación,  $\Delta\varepsilon$ , son grandes y comparables entre sí. Estos dispositivos pueden tener dos o tres terminales.

En la categoría de los dispositivos de puntos cuánticos se incluyen puntos individuales, conocidos también como átomos artificiales, así como parejas de puntos cuánticos (moléculas de punto cuánticos) y los dispositivos llamados celdas de puntos cuánticos que están formados por cuatro o cinco puntos cuánticos, Figura 14 (b).

En los últimos 10 años los puntos cuánticos se han transformado de curiosidades de laboratorio en los bloques constructivos de las futuras nanocomputadoras.

Se han construido puntos cuánticos cuyo tamaño varía desde 30nm hasta 1  $\mu\text{m}$ .

En la Figura 14 (a) los anillos representan cajas en las que los electrones están aislados del entorno circundante. Los electrones pueden entrar o salir de estas cajas ajustando el campo eléctrico en su entorno, Figura 14 (c).

En la Figura 14 (d) se muestra la característica de corriente para un dispositivo de punto cuántico típico. Los “escalones” que se aprecian en la misma se deben a que los valores de  $U$  y  $\Delta\varepsilon$  son comparables.

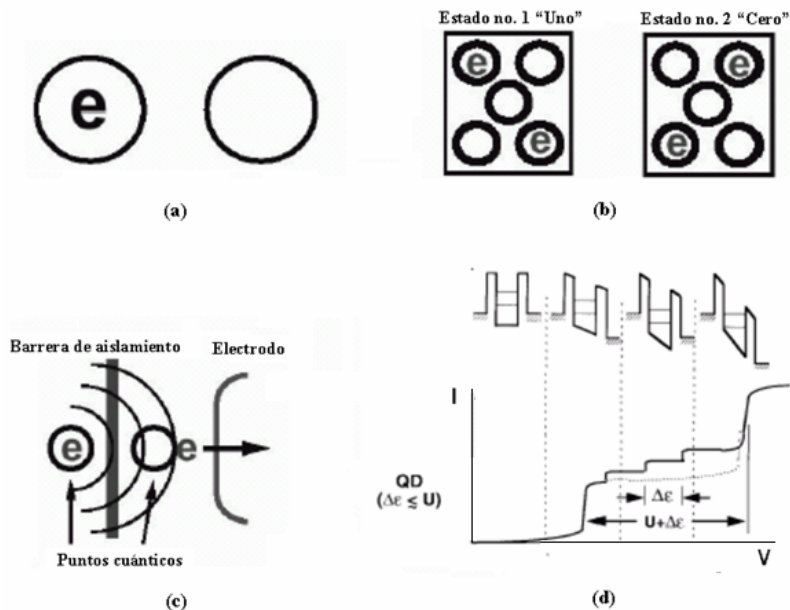


Figura 14. a) Dispositivos de puntos cuánticos. (b). Celdas de puntos cuánticos formadas por cinco puntos cuánticos. c) Los electrones pueden entrar o salir de estas cajas ajustando el campo eléctrico en su entorno. d) Característica de corriente para un dispositivo de punto cuántico típico.

### Transistor de un solo electrón

En general, se considera electrónica de un solo electrón aquella donde se puede controlar el movimiento y posición de un solo electrón o de un número pequeño de ellos. Los transistores llamados de un solo electrón (*Single Electron Transistor, SET*), están formados por dos barreras de tipo túnel y una isla. Las características del dispositivo están determinadas por el tunelaje de los electrones individuales que ocurre a través de las barreras. En estos dispositivos la "isla" es, generalmente, de metal. El metal y las dimensiones de la "isla" se escogen de manera que la energía de carga,  $U$ , sea mucho mayor que la energía de excitación,  $\Delta\epsilon$ , o sea,  $U \gg \Delta\epsilon$ . Este límite se llama "bloqueo de Coulomb".

En la Figura 15 (a) se muestra la estructura de un SET. La isla es de titanio y las barreras están formadas por un óxido de ese metal. En la Figura 15 (b) se muestra el circuito equivalente, donde  $C_G$  representa el acoplamiento capacitivo existente entre el electrodo de compuerta y la isla,  $C_1$  y  $C_2$  representan las barreras túnel. La característica  $I_D$  vs.  $V_D$  está regulada por la tensión aplicada en la compuerta y

presenta picos de corriente cuyos valores están determinados por la energía de carga,  $U$ .

También se ha reportado dispositivos del tipo SET constituido por una molécula orgánica.

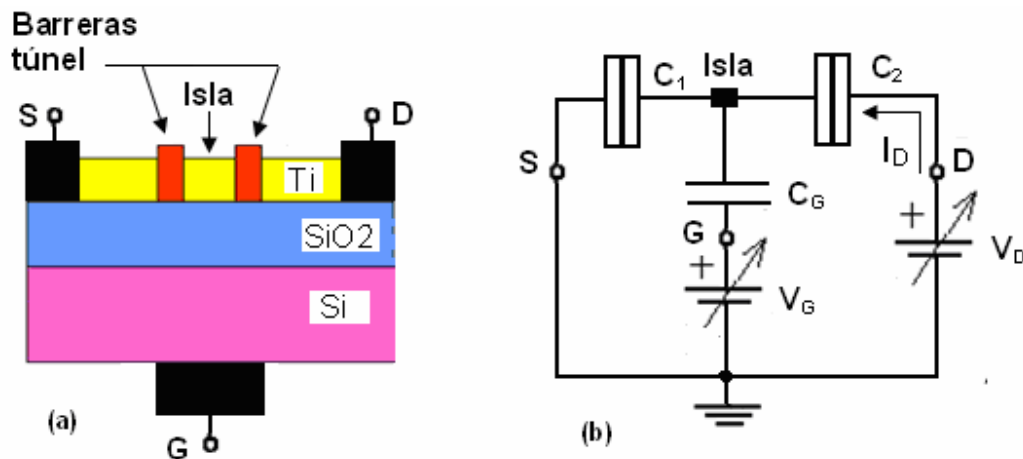


Figura 15. Transistor de un solo electrón (SET)

(a) Estructura, (b) Circuito equivalente

Dificultades de los dispositivos de efecto cuántico y de un solo electrón de estado sólido:

- Con algunas excepciones, los dispositivos sólo funcionan a temperaturas criogénicas.
- Corriente en estado *off* elevada.
- Sensibilidad muy alta de las corrientes túnel a la anchura de las barreras.
- Es difícil obtener islas y barreras túnel con precisión y uniformidad.

## Electrónica molecular [4-6]

La Electrónica Molecular se basa en estructuras moleculares formadas por enlaces covalentes aisladas eléctricamente de un sustrato extenso (*bulk substrate*). Los dispositivos de este tipo están formados por moléculas individuales o por estructuras nanométricas formadas por un conjunto de ellas. El

funcionamiento de los dispositivos moleculares obedece a los modelos de la mecánica cuántica.

El avance científico actual permite que las moléculas, sean fáciles de fabricar y agrupar por billones o trillones. Basado en esto se construyen hilos moleculares que son secuencias de anillos de benceno con ligaduras de acetileno y nanotubos de carbono.

Algunos hechos relevantes relacionados con la electrónica molecular son los siguientes:

- o 1974: A. Aviram y M. A. Ratner proponen un rectificador molecular. [7]

- o 1997: C. Dekker y su grupo de Biofísica Molecular en la Universidad de Delft proponen el primer FET nanotubo. [8]

- o 1999: J. C. Ellenbogen y J.C. Love proponen un rectificador tipo Aviram\_Ratner mejorado. A partir de una lógica de diodos, proponen compuertas AND, OR, XOR y circuitos lógicos combinacionales sencillos. [6]

Desde hace más de veinte años se están realizando numerosas investigaciones tratando de encontrar nuevos materiales y tecnologías que permitan obtener circuitos integrados mucho más pequeños y veloces que sirvan de alternativa a los actuales circuitos integrados de silicio cuando se alcancen los límites físico y económico de este material lo cual, según opinan los expertos, debe ocurrir en la próxima década. En este sentido, la electrónica molecular tiene una importancia creciente en la búsqueda de nuevas alternativas para lograr dispositivos y sistemas electrónicos que sean cada vez más veloces, que ocupen menor espacio y sean más eficientes que sus predecesores producidos en los últimos 50 años por la industria microelectrónica. Como resultado de estas investigaciones ya existen patentes que resuelven algunos de los problemas relacionados con la fabricación de circuitos integrados moleculares.

Para que se tenga una idea de lo que esto pudiera significar en el diseño digital baste señalar que el área requerida por un circuito integrado molecular se estima en un millón de veces menor que la correspondiente a los actuales circuitos integrados de silicio.

Actualmente se trabaja en el desarrollo de cuatro clases de dispositivos de conmutación electrónicos moleculares:

**a) Dispositivos de conmutación moleculares activados por luz.**

En estos dispositivos se utiliza luz para cambiar la forma, la orientación o la configuración electrónica de una molécula que permita o no la circulación de una corriente eléctrica.

**b) Dispositivos moleculares electroquímicos.**

En éstos se utilizan las reacciones electroquímicas para cambiar la forma, la orientación o la configuración electrónica de una molécula que permita o no la circulación de la corriente eléctrica.

Para el funcionamiento de un circuito integrado sería muy difícil aislar la acción luminosa entre los dispositivos que lo constituyen y, por otra parte, el funcionamiento de los dispositivos electroquímicos requerirían la inmersión del circuito integrado en un solvente, por estas razones los dos tipos señalados anteriormente, aunque promisorios en una serie de aspectos, son de menor interés para la construcción de computadoras basadas en circuitos integrados moleculares.

**c) Dispositivos moleculares electromecánicos**

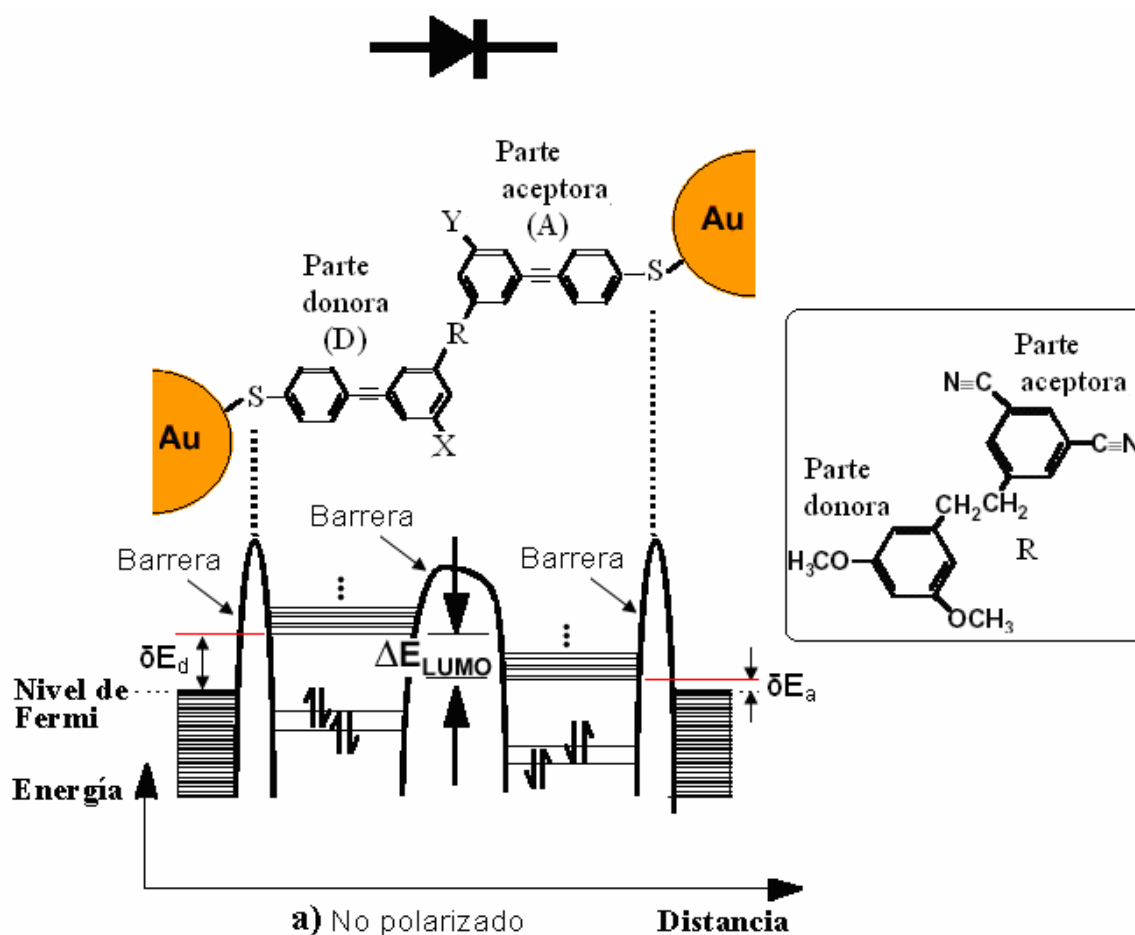
Actúan como interruptores controlados por deformación o reordenación molecular entre dos hilos moleculares. En estos dispositivos se utiliza una fuerza producida eléctricamente, o de forma mecánica, para cambiar la configuración o para mover una molécula, o un grupo de átomos, de conmutación que permita o no la circulación de una corriente eléctrica. Diferentes investigadores han desarrollado dispositivos de este tipo. [9]

**d) Dispositivos de conmutación electrónicos moleculares controlados por campo eléctrico.**

En estos dispositivos se utiliza un campo eléctrico para controlar la circulación de la corriente, entre ellos se encuentran el diodo molecular rectificador así como el diodo molecular túnel resonante, los que se presentan a continuación.

### Diodo molecular rectificador.

En 1974 Aviram y Ratner propusieron un diodo molecular rectificador, conocido actualmente como rectificador Aviram-Ratner. Basándose en ese dispositivo, en 1999 Ellenbogen y Love desarrollaron una variante del mismo que resulta ventajosa para su integración en las estructuras complejas necesarias en la lógica digital. Lo novedoso en esta propuesta consiste en que utilizan alambres moleculares de “polyphenyleno” con “dopamiento” intramolecular para crear dos zonas diferentes, una parte donora y otra aceptora, tal como se ilustra en la Figura siguiente:



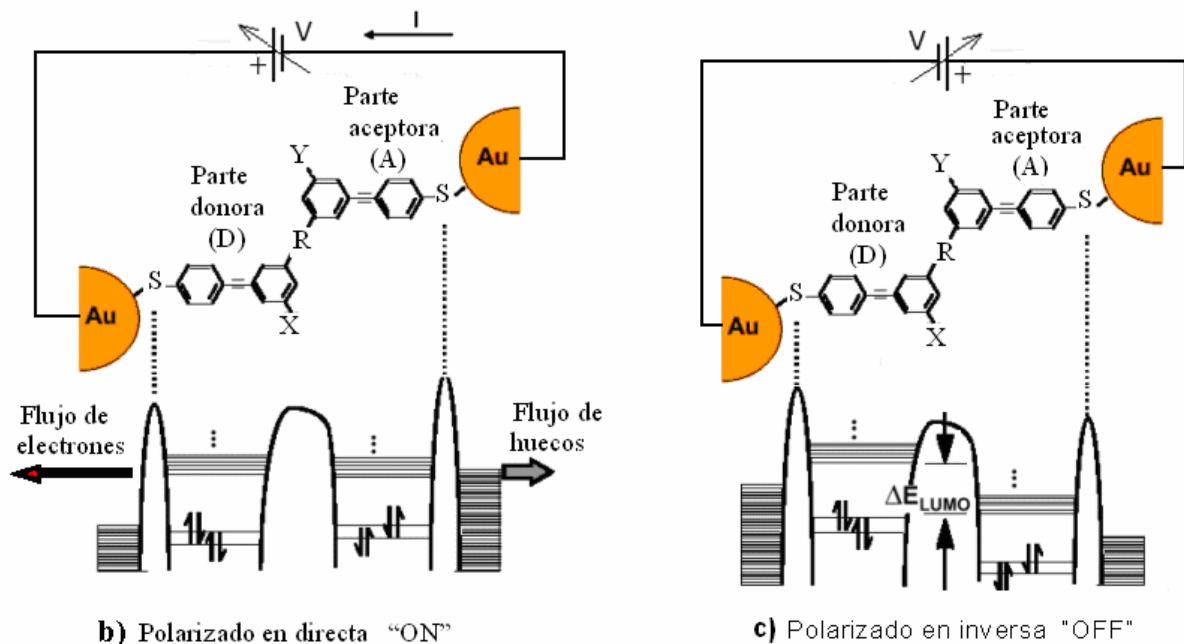


Figura 16. Diodo molecular rectificador propuesto por Ellenbogen y Love

a) Símbolo tradicional para el diodo rectificador, estructura molecular y niveles de energía en el diodo no polarizado, b) Diodo polarizado en directa, c) Diodo polarizado en inversa.

#### Principio de operación del diodo molecular rectificador

Debido a su estructura, el principio de operación del diodo rectificador molecular es diferente al correspondiente a la unión N-P semiconductor. Como se aprecia, en la parte izquierda del diodo molecular debido al "dopamiento" producido por el grupo X que dona<sup>2</sup> electrones se crea una zona donora, mientras que en la parte derecha del diodo debido al "dopamiento" producido por el grupo Y que acepta electrones se crea una zona aceptora. Las zonas donoras y aceptoras en este diodo molecular están separadas por un puente semiaislador formado por el grupo R (constituido por un grupo alifático tal como el  $-\text{CH}_2$  o el  $-\text{CH}_2\text{CH}_2$ ) el cual crea una barrera de energía potencial que impide que se produzca el equilibrio en la densidad de electrones entre las partes donora y aceptora. A través de esta

<sup>2</sup> Entre los grupos que donan electrones se encuentran los siguientes:  $-\text{NH}_2$ ,  $-\text{OH}$ ,  $-\text{CH}_3$ ,  $-\text{CH}_2\text{CH}_3$ ; mientras que los grupos  $-\text{NO}_2$ ,  $-\text{CN}$ ,  $-\text{CHO}$  son aceptores de electrones.

barrera se puede producir el paso de los electrones, por efecto túnel, si se establece una polarización externa con la polaridad adecuada.

Existen también otras dos barreras de energía potencial asociada con cada uno de los contactos metálicos en los extremos del diodo que tienden a impedir el flujo de electrones desde el contacto metálico hacia cualquiera de las regiones del dispositivo cuando éste no está polarizado. Como se aprecia en la Figura 16a) los niveles de energía en los orbitales de la parte donora son más elevados, debido a la mayor densidad de electrones, que los correspondientes a los orbitales de la parte aceptora. Esto determina que la diferencia de energía entre el nivel de Fermi en el contacto metálico y el nivel inferior de energía en los orbitales desocupados en la parte donora ( $\delta E_d$ ) sea mayor que la diferencia de energía entre el nivel de Fermi en el contacto metálico y el nivel inferior de energía en los orbitales desocupados en la parte aceptora ( $\delta E_a$ ), o sea,  $\delta E_d > \delta E_a$ . Debido a esto no hay un flujo neto de portadores de carga a través del diodo cuando no está polarizado, como tiene que ser pues en la Figura a) los terminales del diodo están en circuito abierto.

Polarización directa:

De lo explicado anteriormente se comprende que la polarización externa que permite el flujo de electrones, mediante el efecto túnel, desde el contacto metálico hacia la cadena molecular deberá aplicarse como se ilustra en la Figura 16b) a fin de elevar el nivel de Fermi de los electrones de valencia en el contacto metálico con la región aceptora para que pueda igualarse con el nivel de energía inferior en los orbitales desocupados. Este tipo de polarización, llamada directa, disminuye, además, la energía de todos los orbitales desocupados en la región donora lo que permite que se alineen con los correspondientes a la región aceptora a ambos lados de la barrera de potencial central creada por el grupo R posibilitando el efecto túnel a través de dicha barrera. En el contacto metálico correspondiente a la parte donora el nivel de Fermi de los electrones de valencia disminuye lo cual facilita que se produzca el efecto túnel en esa zona, pues por encima del nivel de Fermi hay numerosos estados energéticos vacíos. Como consecuencia de todo esto se producirá un flujo de electrones de derecha a izquierda y un flujo de



“huecos” en sentido contrario por dentro de la molécula, tal como se ilustra en la Figura 16b), dando lugar a la circulación de corriente.

#### Polarización inversa

Consiste en aplicar la parte de mayor potencial a la región derecha y la de menor potencial a la izquierda. En la Figura 16 c) se ha aplicado una tensión de polarización de signo contrario e igual magnitud que la aplicada en la Figura 16b); pero en este caso no se consigue alinear el nivel de Fermi de los electrones de la banda de valencia del contacto metálico con la región donora con el nivel inferior de energía orbital de los estados no ocupados en dicha región por lo que no se produce el efecto túnel impidiendo así la circulación de corriente. Para lograr que circulara corriente inversa sería necesario la aplicación de una tensión de polarización inversa mucho mayor que cuando se aplica polarización directa. Queda, pues, comprobado el carácter rectificador de este diodo molecular.

En la Figura 17 se muestra una compuerta OR molecular propuesta por Ellenbogen y Love utilizando diodos moleculares rectificadores como el que acabamos de estudiar.

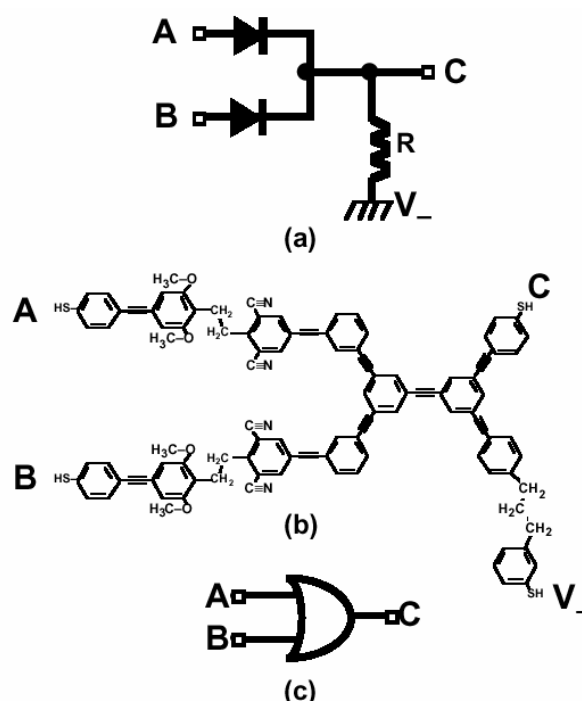


Figura 17. Compuerta OR molecular.

a) Diagrama circuital b) Estructura c) Símbolo lógico.

### Diodo molecular túnel resonante

Tour [10] ha propuesto un diodo molecular resonante a partir de un “alambre molecular” en el que se han insertando grupos que rompen la secuencia de los orbitales conjugados, lo que provoca la aparición de dos barreras de potencial y el consiguiente pozo de energía potencial entre ellas, tal como se muestra a continuación:

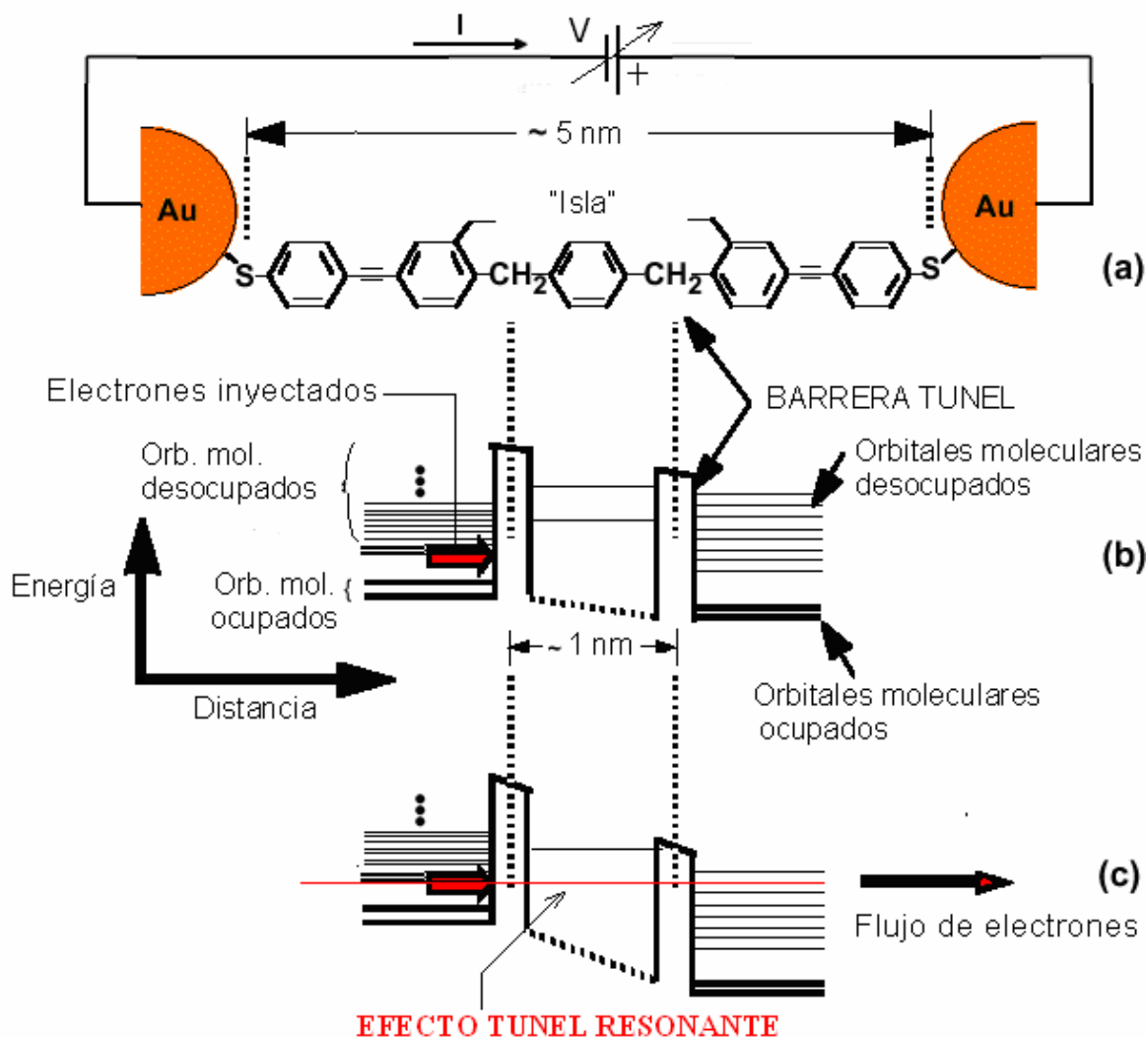


Figura 18. Diodo molecular túnel resonante propuesto por Tour

Al igual que el diodo túnel resonante de estado sólido, la característica  $I$  vs.  $V$  del diodo molecular túnel resonante presenta picos debido a la resonancia con los diferentes niveles de energía permisible para los electrones dentro de la "isla". Si comparamos la estructura de los niveles de energía en las diferentes regiones del

diodo molecular túnel resonante con la correspondiente al diodo túnel resonante de estado sólido en la Figura 12, vemos que en las regiones correspondientes a la fuente y al drenaje, en lugar de bandas de energía tenemos niveles de energía discretos. Esto se debe a que en el diodo resonante molecular en estas regiones existen unos pocos electrones en lugar de la gran cantidad que hay en el diodo de estado sólido.

#### Principio de operación diodo molecular túnel resonante:

Como en el diodo molecular rectificador que se estudió anteriormente, en el diodo molecular túnel resonante existen dos barreras de energía potencial asociada con cada uno de los contactos metálicos en los extremos del diodo. Estas barreras impiden el flujo de electrones desde el contacto metálico hacia cualquiera de las regiones del dispositivo cuando éste no está polarizado.

Sin embargo, a diferencia del diodo molecular rectificador, en el diodo molecular túnel resonante no existen las regiones donoras y aceptoras, por lo tanto, los desniveles de energía existentes entre el nivel de Fermi de los electrones en la banda de valencia del contacto metálico con relación al nivel de energía inferior en los orbitales moleculares desocupados son iguales en los dos extremos del diodo. Por consiguiente no hay preferencia en la polaridad de la tensión externa que debe aplicarse al diodo, o sea, este diodo no tiene carácter rectificador. Su aplicación es en circuitos digitales, donde lo que se necesita es poder diferenciar dos estados, que generalmente se asocian con “0” y “1”.

La Figura 18 b) corresponde a una polarización externa ( $V$ ) que permite elevar el nivel de Fermi de los electrones de valencia en el contacto metálico para que se iguale con el nivel de energía inferior en los orbitales desocupados de la región molecular, esto provoca la inyección de electrones desde el contacto metálico hacia la cadena molecular. Esta inyección de electrones está indicada por la flecha que aparece en la parte izquierda de la Figura. También se aprecia que para esta polarización la energía de los electrones inyectados es menor que el nivel inferior de energía permitido para los electrones dentro de la “isla”, lo que dificulta que se produzca el efecto túnel a través de la misma, necesario para que el flujo de electrones alcance los orbitales moleculares desocupados de la región molecular

situada al lado derecho. Por lo tanto, con esta polarización prácticamente no circula corriente por el diodo.

En cambio, en la Figura 18 c, se ha aumentado la tensión de la polarización externa aplicada (V) suficiente para que se produzca el efecto túnel resonante ya que los electrones inyectados a los niveles inferiores de energía de los orbitales moleculares desocupados situados a la izquierda de la Figura han igualado su energía con la correspondiente al nivel inferior de energía permitida a los electrones dentro de la “isla” y este nivel, a su vez, está alineado con los niveles de energía correspondiente a los orbitales desocupados que aparecen en la parte derecha. Debido a esto hay un flujo grande de electrones y se produce un pico de corriente en el diodo.

En la Figura 19, se muestra una compuerta molecular OR Exclusivo la que ha sido propuesta por Ellenbogen y Love [6] modificando la estructura interna de la compuerta OR molecular de la Figura 17, añadiendo un diodo molecular túnel resonante.

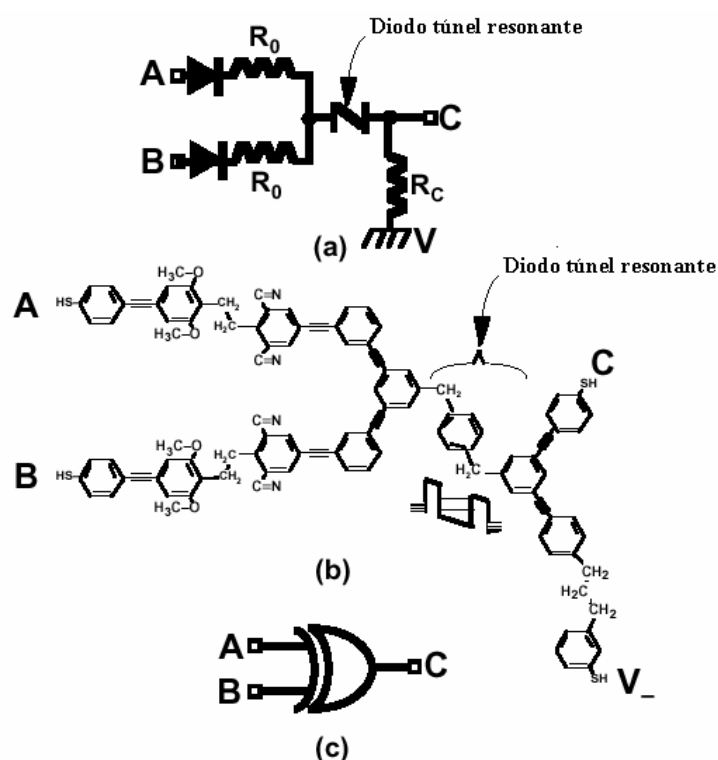


Figura 19. Compuerta OR Exclusivo molecular

a) Diagrama circuital, b) Estructura molecular, c) Símbolo lógico.

### **Transistor de efecto de campo con nanotubo de carbón [8]**

Los nanotubos de carbono son estructuras relacionadas con los fullerenos. Consisten en cilindros de grafito cerrados por sus extremos cuyos diámetros son aproximadamente de 1 nm y su longitud puede alcanzar varios mm. Fueron descubiertos por Sumio Iijima en 1991, observando el material depositado en el cátodo durante la síntesis de fullereno mediante evaporación por arco de grafito. En 1993 se sintetizaron nanotubos con paredes monoatómicas.

Durante muchos años se pensó que el elemento carbono existía en dos formas alotrópicas, el diamante y el grafito. El carbono es uno de los elementos más investigados, por lo que fue una gran sorpresa el descubrimiento en 1985 de una familia entera de formas alotrópicas distintas, los fullerenos. Este descubrimiento fue el resultado de las investigaciones sobre la formación de compuestos de carbono en el interior de las estrellas realizadas por H. W. Kroto, en colaboración con R. F. Curl y R. E. Smalley; por ello, los tres científicos recibieron el Premio Nobel de Química en 1996.

Gracias a sus propiedades mecánicas y eléctricas ofrecen potencialmente grandes perspectivas de aplicación, entre ellas pueden mencionarse el almacenamiento de hidrógeno y la construcción de sensores, alambres cuánticos y transistores de efecto de campo. En la Figura 20 se muestran las formas alotrópicas del carbono mencionadas anteriormente y en la Figura 21 aparece el esquema de un transistor de efecto de campo cuyo canal está constituido por un nanotubo de carbono.

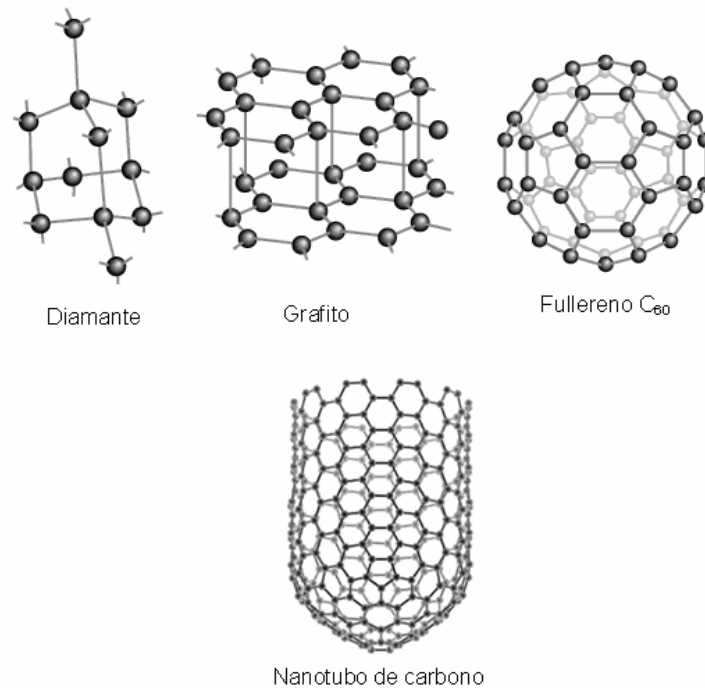


Figura 20. Formas alotrópicas del carbono

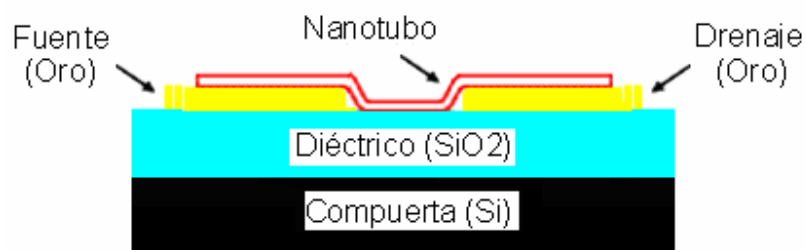


Figura 21. Esquema de un transistor de efecto de campo con nanotubo de carbón (CNTFET)

### Limitaciones de los dispositivos moleculares

Las limitaciones fundamentales en la construcción y funcionamiento de los dispositivos moleculares están relacionadas, entre otras, con el principio de indeterminación de Heisemberg, las fluctuaciones termodinámicas y factores económicos.

### **Electrónica orgánica. Dieléctricos y semiconductores orgánicos. [11]**

La llamada electrónica orgánica está formada por dispositivos orgánicos cuya estructura corresponde a la escala micrométrica, semejante a los dispositivos contruidos con semiconductores inorgánicos. Su funcionamiento se basa, por lo tanto, en el movimiento de los portadores de carga según los modelos de la física clásica.

Más lentos que los circuitos electrónicos de silicio debido a que la movilidad de los semiconductores orgánicos disponibles es aproximadamente de  $1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ , pero más flexibles y baratos la electrónica orgánica es una alternativa atractiva para la producción de *displays* sobre substratos plásticos muy ligeros y flexibles en lugar de los *displays* convencionales, que son frágiles y pesados ya que están fabricados sobre un substrato de vidrio.

Hay dos tipos diferentes de semiconductores orgánicos: Los oligómeros y los polímeros. Los oligómeros están contruidos por moléculas orgánicas pequeñas tales como el tetraceno y el pentaceno que son semiconductores de tipo P.

Los polímeros poseen cadenas largas. Entre los polímeros semiconductores se encuentran el poliacetileno y el politiofeno.

Los dispositivos orgánicos se pueden construir empleando oligómeros o polímeros. Su depósito se realiza mediante evaporación térmica al vacío para los oligómeros y mediante técnicas de impresión en el caso de los polímeros.

La gran ventaja del empleo de los polímeros semiconductores radica en que son plásticos lo que los hace ideales en aplicaciones donde se requiera materiales que sean flexibles, maleables y ligeros.

El polimetil metacrilato (PMMA) y la poliamida son ejemplos de materiales dieléctricos orgánicos.

Entre los dispositivos convencionales basados en materiales orgánicos pueden señalarse los siguientes: Transistores orgánicos de efecto de campo (OFET), diodos orgánicos emisores de luz (OLED), celdas solares orgánicas y láseres orgánicos.

### Transistores orgánicos de efecto de campo.

Los transistores orgánicos de efecto de campo (OFET) utilizan un semiconductor orgánico en su canal. La geometría típica de un OFET es semejante a la utilizada en los transistores de capa delgada (TFT). En la Figura 22 se aprecia en la parte superior las regiones de fuente y drenaje y en la parte inferior la compuerta. El sustrato es plástico y los electrodos de fuente y drenaje son metálicos (oro) mientras que el contacto de compuerta es un óxido conductor, por ejemplo, óxido de indio-estaño (ITO).

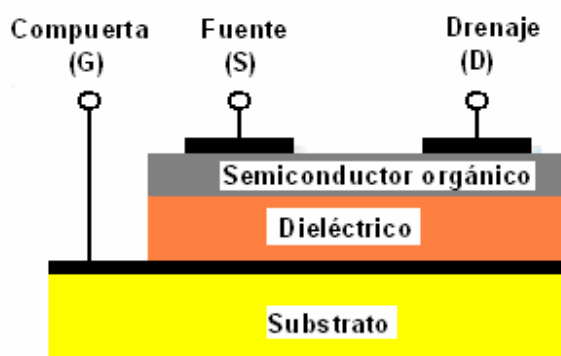


Figura 22. Geometría típica de un transistor orgánico de efecto de campo (OFET)

Los OFET que utilizan pentaceno en su canal son comparables a los transistores de capa delgada cuyo canal es de silicio amorfo. Se ha demostrado experimentalmente que los arreglos de transistores impresos en plásticos funcionan bien incluso después de doblarse considerablemente. Esta cualidad es muy importante para las aplicaciones que requieren electrónica flexible.

### Diodos orgánicos emisores de luz (OLED).

Cuando se les utiliza en la producción de *displays* cada OLED constituye un punto en una imagen, o sea, es un *píxel*. Cada *píxel* es controlado por un OFET. Se depositan sobre un sustrato plástico, consumen menos energía y tienen un ángulo de visión mayor de 160 grados, mejor que el de los *displays* convencionales.

### Otras aplicaciones de los dispositivos orgánicos.

Además de los *displays* se trabaja en el desarrollo de otras aplicaciones de la electrónica orgánica tales como sensores, tarjetas inteligentes, papel electrónico, etiquetas RFID y juguetes.



Papel electrónico (*e-paper*).

Se ha trabajado en el desarrollo de varias tecnologías para la producción de papel electrónico, con éste se pretende imitar la apariencia de la tinta sobre el papel común. A diferencia de un *display* plano convencional, que utiliza luz para iluminar sus píxeles, el papel electrónico refleja la luz y es capaz de mantener un texto e imágenes indefinidamente sin consumir energía eléctrica. El consumo de energía solamente ocurre durante el cambio de los contenidos reflejados en el papel electrónico.

En los sistemas de identificación por radiofrecuencia (RFID) se emplea las llamadas etiquetas RFID que contienen una antena y un *chip* pequeño. Estas etiquetas pueden almacenar más información que la contenida en un código de barras y tienen la ventaja adicional de poderse leer a mayor distancia mediante una señal de radio.

### **Dispositivos del tipo uniones túnel magnéticas, MTJ (*Magnetic Tunnel Junctions*).**

#### **Estructura y principio de funcionamiento [12]**

Este dispositivo basa su funcionamiento en el spin de los electrones. La existencia del spin fue postulada a fines de la década de los años 20 por el ingeniero eléctrico Paul Dirac, a quien se le confirió el Premio Nóbel de Física por este descubrimiento en 1933. Desde el comienzo de la década de los años 80 los investigadores en el campo de la microelectrónica han trabajado en la búsqueda de aplicaciones prácticas del spin. Basados en el spin, en 1998 se introdujeron mejoras notables en la fabricación de los discos duros lo que ha posibilitado aumentar considerablemente la cantidad de bits que pueden almacenarse en los mismos. Otro resultado importante en esta área es el desarrollo y construcción del dispositivo del tipo uniones túnel magnéticas (MTJ) mostrado en la Figura 23:



Figura 23. Uniones Túnel Magnéticas (MTJ)

a) La magnetización de las dos capas ferromagnéticas apunta en la misma dirección; la resistencia eléctrica del dispositivo es baja (cientos de Ohm). b) La magnetización de las dos capas ferromagnéticas apuntan en direcciones opuestas; la resistencia eléctrica es grande (cientos de Kohm).

El MTJ está formado por dos capas de material ferromagnético separadas por un dieléctrico, óxido de aluminio. Cuando se aplica una diferencia de potencial pequeña, fluye una corriente de electrones debido al efecto túnel que se produce a través del dieléctrico. La mayor o menor facilidad con que se produce el efecto túnel a través de la barrera aislante depende de la magnetización relativa de las dos capas ferromagnéticas del dispositivo. Cuando la magnetización de las dos capas ferromagnéticas apunta en la misma dirección, como se ilustra en la Figura 23 a), hay una probabilidad grande de que los electrones atraviesen la barrera y, por consiguiente, la resistencia eléctrica del dispositivo es baja (cientos de Ohm). En cambio, cuando la magnetización de las dos capas ferromagnéticas apuntan en direcciones opuestas, Figura 23 b), el dispositivo ofrece una resistencia eléctrica grande (cientos de Kohm). La resistencia eléctrica de la barrera túnel puede variarse varios órdenes cambiando el espesor de la capa de aluminio, las condiciones de oxidación de la misma y el área de la unión. Este dispositivo es un candidato excelente para sustituir al capacitor, utilizado hasta ahora en la celda básica de las memorias DRAM, como elemento de almacenamiento de la información ya que permite obtener una celda básica no volátil.

Los dispositivos MTJ pueden emplearse también como sensores.

## Referencias

- [1] G. E. Moore, VLSI: some fundamental challenges, *IEEE spectrum*, Vol.16, p. 30, 1979.
- [2] R. T. Bate, "Nanoelectronics," *Nanotechnology*, Vol. 1, pp. 1-7, 1990.
- [3] J. Millman and C. C. Halkias, *Integrated Electronics: Analog and Digital Circuits and Systems*, Mc Graw Hill, 1972.
- [4] D. Goldhaber-Gordon, M.S. Montemerlo, J.C. Love, G.J. Opiteck, and J. C. Ellenbogen, "Overview of Nanoelectronic Devices," *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, VOL.85, No.4, April 1997.
- [5] R. P. Feynman. "There's Plenty of Room at the Bottom, An Invitation to Enter a New Field of Physics". This transcript of the classic talk that Richard Feynman gave on December 29th 1959 at the annual meeting of the [American Physical Society](#) at the [California Institute of Technology \(Caltech\)](#) was first published in the February 1960 issue of Caltech's *Engineering and Science*, which owns the copyright. It has been made available on the web at <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>
- [6] J. C. Ellenbogen and J.C. Love, "Architecture for molecular electronic computers: 1. Logic structures and an adder built from molecular electronic diodes", MITRE, [http://www.mitre.org/research/nanotech/MITREnano\\_group.html](http://www.mitre.org/research/nanotech/MITREnano_group.html), July 1999.
- [7] A. Aviram and M. A. Ratner, "Molecular Rectifiers", *Chem. Phys. Lett.*, vol. 29, pp. 277-283, 1974.
- [8] S.J. Tans, A.R.M. Verschueren, and C. Dekker," Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube", *Nature*, 393, 49-52 (1998). Nanotubes win Euro prize, <http://physicsweb.org/article/news/5/10/7>, 11 October 2001.
- [9] Y. Wada *et al.*, A proposal of nanoscale devices based on atom/molecule switching, *J. Appl. Phys.*, pp. 7321–7328, Dec.15, 1993.
- [10] J. M. Tour, M. Kozaki, and J. M. Seminario, "Molecular Scale Electronics: A Synthetic/Computational Approach to Digital Computing", *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 120, pp. 8486-8493, 1998.
- [11] S. K. Moore, "Just One Word - Plastics," *IEEE Spectrum*, pp. 2-5, September 2002.
- [12] S. Parkin, *Magnetic Tunnel Junctions*, IBM Research, [www.ibm.com](http://www.ibm.com)
- [13] M. A. Reed and T. Lee (Editors), *Molecular Nanoelectronics*, American Scientific Publishers, 2003.
- [14] J. H. Richards, D. J. Cram and G. S. Hammond, *Elements of Organic Chemistry*, Mc Graw Hill, 1967.
- [15] G. I. Brown, *An Introduction to Electronic Theories of Organic Chemistry*, Logmans, Green and Co. Ltd., 1958.
- [16] R. O. Brewster and W. E. McEwen, *Química Orgánica*, ER, 1979.
- [17] J. D. Roberts and M. C. Caserio, *Modern Organic Chemistry*, ER, 1970.

## Anexo 1: Teoría del escalado

A partir de la comercialización de los primeros microprocesadores y memorias la evolución de la tecnología microelectrónica vino marcada por la necesidad de incrementar la complejidad y velocidad de los primeros y la capacidad de las segundas. En 1972. *R.H. Dennard* estableció las reglas para disminuir las dimensiones de un transistor optimizado sin que se degradaran sus características, mediante la teoría del escalado. Esta teoría se basa en dos formulaciones básicas:

a) “*Campo eléctrico constante*”, todas las dimensiones lineales y potenciales eléctricos del transistor se dividen por un factor  $\alpha > 1$  y las concentraciones de impurezas se multiplican por  $\alpha$ .

b) Posteriormente, en lo que se llamó la teoría “generalizada”, los potenciales se escalan en un factor  $\varepsilon/\alpha$  ( $\varepsilon > 1$ ) y las concentraciones de impurezas en un factor  $\varepsilon\alpha$ . Las características del transistor sólo se ven afectadas por un factor de escala, del siguiente modo:

- La superficie de los dispositivos e interconexiones se reducen en un factor  $\alpha^2$
- La intensidad del campo eléctrico en el interior de los dispositivos y la densidad de potencia no cambian
- El retardo de puerta disminuye en un factor  $\alpha$
- En los *chips* escalados aumenta tanto la densidad de integración como la velocidad

Con esto se obtuvieron transistores MOS hasta con canales de longitud igual a  $0.7\mu\text{m}$  y tensiones de trabajos de hasta 5V. La tecnología MOS de silicio logró obtener transistores con un ancho de canal de 40nm, aunque innumerables obstáculos ocurren cuando el canal baja de los 100 nm.

Pero la necesidad de obtener dispositivos más pequeños y trabajar con tensiones de alimentación menores llevó a diseñar dispositivos más allá de la teoría del escalado. Se debía escalar todas las tensiones y dimensiones apareciendo los siguientes problemas:

- **Corriente sub umbral**

Al disminuir la tensión umbral aparece en el estado de corte de los transistores una corriente sub umbral importante y un aumento considerable de la potencia estática.

- **Efectos de canal corto**

El más notable es la disminución de la tensión umbral.

- **Corriente túnel en la compuerta**

Para espesores del óxido de compuerta inferiores a 2 nm y tensiones de alimentación alrededor de 1V, aparece una corriente túnel de compuerta importante que contribuye al aumento de la potencia estática.

- **Distribución de impurezas**

Efectos de la distribución estadística de las impurezas.

- **Otros efectos de campo eléctrico elevado**

Discretización de los niveles de energía en el canal, degradación de la movilidad, corrientes túnel banda a banda en el silicio, etc.

Dada la imposibilidad de responder a todos estos compromisos la tecnología CMOS se divide en dos tipos:

- Tecnología CMOS de alta velocidad
- Tecnología CMOS de bajo consumo

Los límites absolutos del escalado para los dispositivos CMOS tradicionales se sitúan en:

- Longitud de compuerta 50 nm
- Espesor del óxido de compuerta 2 nm
- Tensión de alimentación 1V

Se establecen dos caminos para superar los límites de la tecnología CMOS convencional

1. Tecnologías que tienen características mejores que el CMOS convencional para unas mismas dimensiones

1.1 Tecnología SOI

La tecnología SOI (*Silicon-on-insulator*) es una variante de la tecnología CMOS convencional. Utiliza obleas con una capa de SiO<sub>2</sub> enterrada a una profundidad de

150 nm. Los transistores se construyen en el silicio situado por encima de esta capa y presentan un valor muy pequeño de la capacidad respecto al sustrato. La velocidad de conmutación aumenta, disminuye el consumo de energía y, en general, mejoran las características de los transistores CMOS del *chip*.

## 1.2 Tecnologías Si-Ge

La impurificación de la base de un transistor bipolar con pequeñas cantidades de germanio, modifica la estructura de bandas de energía de la base del transistor y hace aumentar considerablemente su velocidad de conmutación.

## 2. Tecnologías que permiten superar los límites del escalado del CMOS convencional

### 2.1 Estructuras MOS de doble Compuerta

Son estructuras 3D que eliminan los efectos de canal corto y para una misma tensión de puerta controla el doble de corriente, respecto a una estructura análoga convencional. Hay varias propuestas de este tipo de estructuras.

## Anexo 2: Algunos aspectos de Química Orgánica [14-17]

Química Orgánica: Es la que se dedica al estudio de los compuestos de carbono.

Los compuestos de carbono se clasifican en alifáticos y aromáticos.

La urea fue el primer compuesto orgánico obtenido por vía sintética en el laboratorio, esto fue realizado por Wohler en Alemania en 1828.

Tetravalencia del carbono: El átomo de carbono está unido a los átomos vecinos mediante cuatro covalencias. Las fórmulas estructurales de casi todos los compuestos orgánicos se basan en la tetravalencia del carbono.

Enlace covalente: Los electrones que forman el enlace covalente están compartidos entre dos átomos. De acuerdo a la cantidad de electrones compartidos, los enlaces pueden ser sencillos, dobles o triples.

Enlace sencillo: Se comparte un par de electrones.

Enlace doble: Se comparte dos pares de electrones.

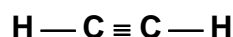
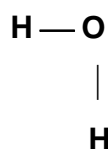
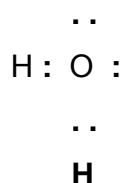
Enlace triple: Se comparte tres pares de electrones.

Ejemplos:

Enlace sencillo

Enlace doble

Enlace triple



En la parte superior cada electrón es representado por un punto. En la parte inferior cada par de electrones se representa por una raya colocada entre los átomos que comparten los electrones.

Estructura electrónica de los elementos: La solución de la ecuación fundamental de la Mecánica Cuántica aplicada al átomo requiere de cuatro números cuánticos, generalmente designados como  $n$ ,  $l$ ,  $m_l$  y  $s$ . Lo que pueden tomar los valores siguientes:

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

$$l = 1, 2, \dots (n-1)$$

$$m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \pm l$$

$$s = \pm 1/2$$

Principio de exclusión de Pauli: Dos electrones no pueden tener iguales sus cuatro números cuánticos.

Número atómico (Z): Es la cantidad de electrones que posee un átomo.

En la Tabla siguiente se muestra las configuraciones electrónicas de los 10 primeros elementos en la Tabla Periódica:

Símbolo	Z	1S	2S	2p <sub>x</sub>	2p <sub>y</sub>	2p <sub>z</sub>
H	1	1				
He	2	2				
Li	3	2	1			
Be	4	2	2			
B	5	2	2	1		
C	6	2	2	1	1	
N	7	2	2	1	1	1
O	8	2	2	2	1	1
F	9	2	2	2	2	1
Ne	10	2	2	2	2	2

*Orbital*: Es una ecuación matemática complicada, obtenida a partir de la mecánica cuántica, que define una región del espacio en la que existe una probabilidad determinada de hallar un electrón. El orbital puede estar referido al átomo o a la molécula.

En un orbital puede haber, como máximo, dos electrones (Principio de exclusión).



*Orbitales híbridos:* Se producen debido al paso de electrones del nivel 2s hacia el nivel de mayor energía 2p. Este pasaje es posible debido a que la hibridación de los orbitales permite la formación de enlaces covalentes con la correspondiente liberación de energía. Los orbitales híbridos  $sp^2$  representan una mezcla de orbitales 2s y 2p.

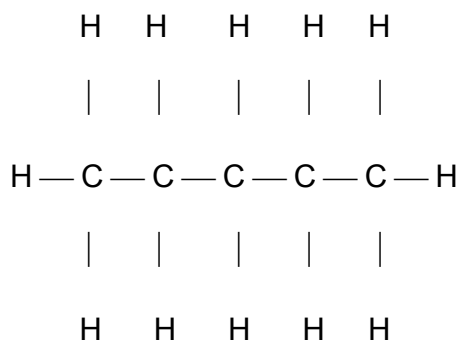
*Orbitales  $\sigma$ :* El solapamiento de orbitales  $sp^2$  produce orbitales  $\sigma$ . Los electrones que se hallan en un orbital de este tipo a veces se les llama electrones  $\sigma$ .

*Orbital  $\pi$ :* El solapamiento de orbitales p produce un orbital  $\pi$ . Los electrones que se hallan en un orbital de este tipo a veces se les llama electrones  $\pi$ .

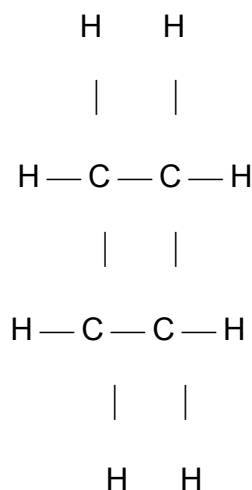
*Resonancia:* Existe en las moléculas o iones poliatómicos, que pueden representarse por dos o más estructuras de contenidos energéticos aproximadamente iguales y que difieren solamente en la posición de los electrones.

Hidrocarburos: Compuestos orgánicos donde sólo intervienen el carbono y el hidrógeno. Se clasifican en alifáticos y aromáticos.

Ejemplos de hidrocarburos alifáticos:



n-pentano (acíclico)



Ciclobutano (cíclico)

*Hidrocarburo aromático:* Contienen anillos que tienen enlaces carbono-carbono dobles y sencillos en forma alterna. Ejemplo el benceno ( $C_6H_6$ ).

Muchos hidrocarburos contienen tanto partes aromáticas como alifáticas.

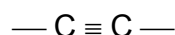
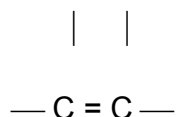
*Hidrocarburos saturados:* Los enlaces carbono-carbono son sencillos. Ejemplos el n-pentano y el ciclobutano.

*Hidrocarburos no saturados:* Contienen enlaces carbono-carbono dobles o triples.

Ejemplos:

Enlace doble

Enlace triple



Grupos funcionales

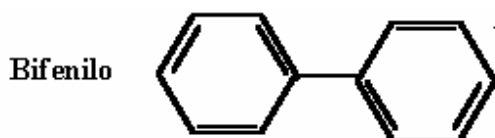
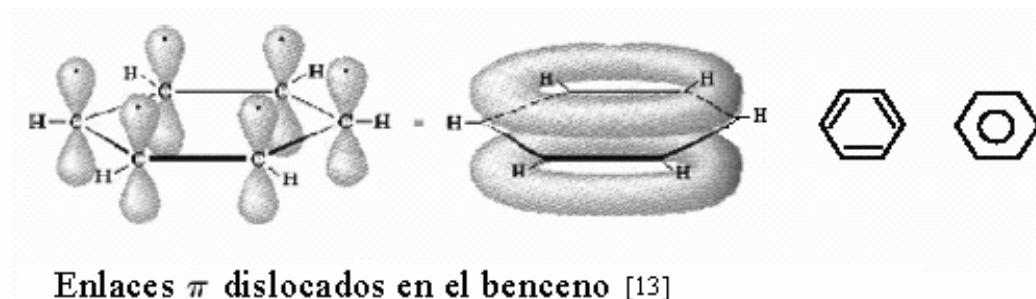
*Conjugación:* Cuando los enlaces dobles y los enlaces sencillos se alternan en una molécula, o cuando un átomo con electrones libres está separado de un enlace doble por un enlace sencillo, tienen lugar ciertas interacciones que afectan la naturaleza de los enlaces. Esta interacción es conocida como conjugación.

Las moléculas que contienen enlaces dobles conjugados, a veces son llamadas moléculas conjugadas o sistemas conjugados. La molécula de benceno es un ejemplo típico de sistema conjugado.

Algunos datos sobre el benceno ( $C_6H_6$ ): Peso molecular 78. Su molécula es plana con los 6 átomos del carbono localizados en los vértices de un hexágono regular. Los 6 átomos de hidrógeno se encuentran situados en ese mismo plano y dispuestos en forma radial con respecto a los átomos de carbono.

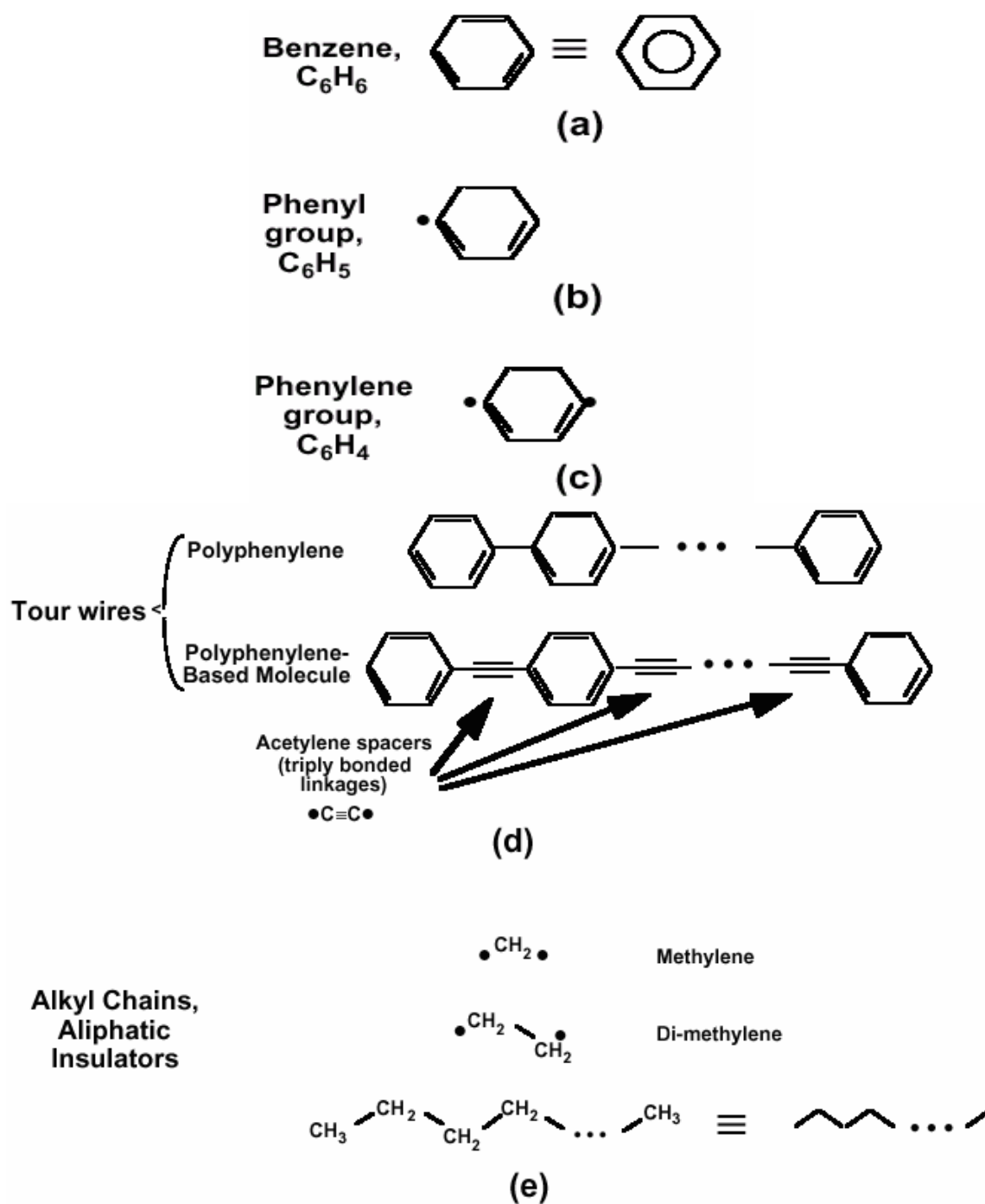
*Orbitales moleculares del benceno:* Un átomo de carbono por hibridación de un orbital s y dos orbitales p (hibridación  $sp^2$ ) es capaz de formar tres enlaces covalentes que se encuentran en un plano y que tienen ángulo de valencia de  $120^\circ$ . El tercer orbital p tiene su eje longitudinal perpendicular al plano determinado por los tres orbitales  $sp^2$ . Además el orbital p de cada átomo se superpone a uno similar a cada lado de él, dando origen a tres orbitales  $\pi$ . En los tres orbitales  $\pi$ , la

densidad de electrones está uniformemente distribuida sobre la molécula, o sea los electrones  $\pi$  están dislocados, como se muestra en la figura siguiente:

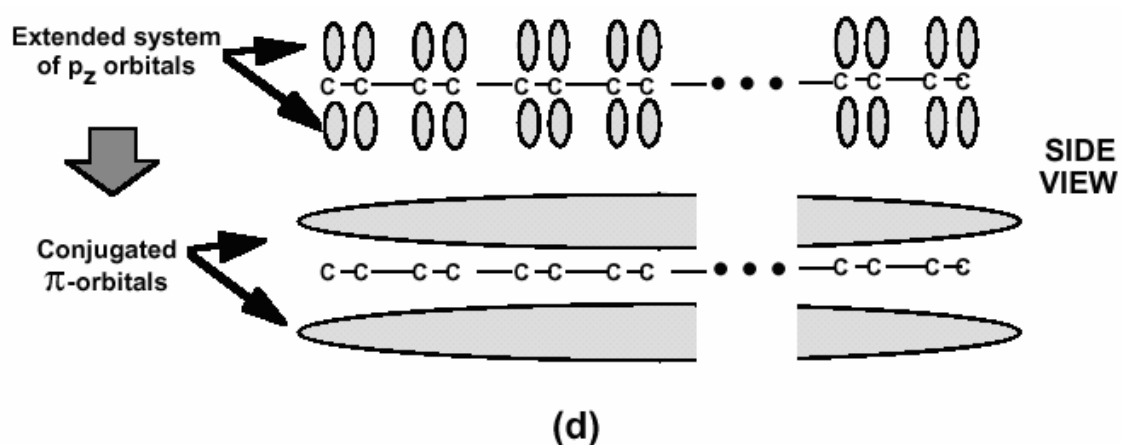
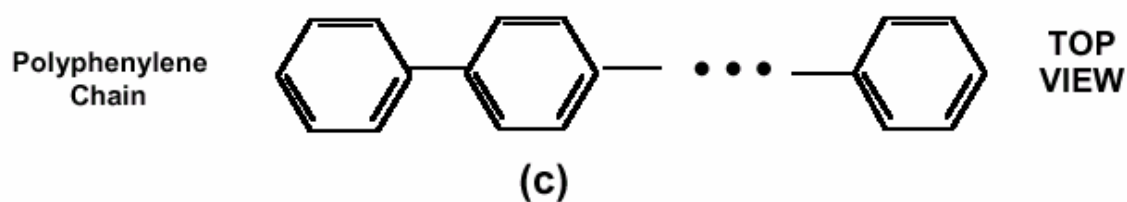
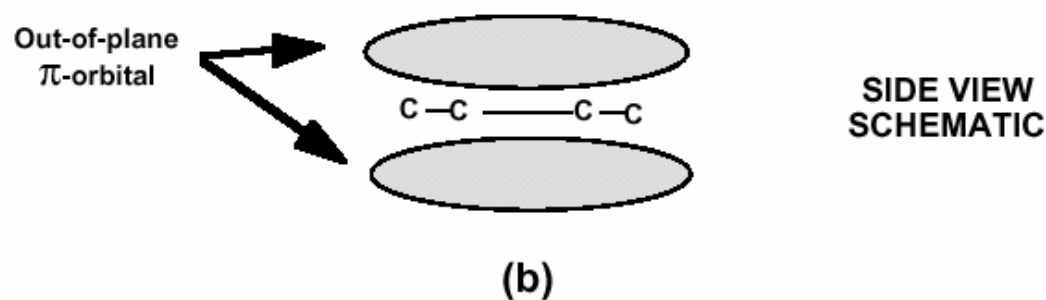
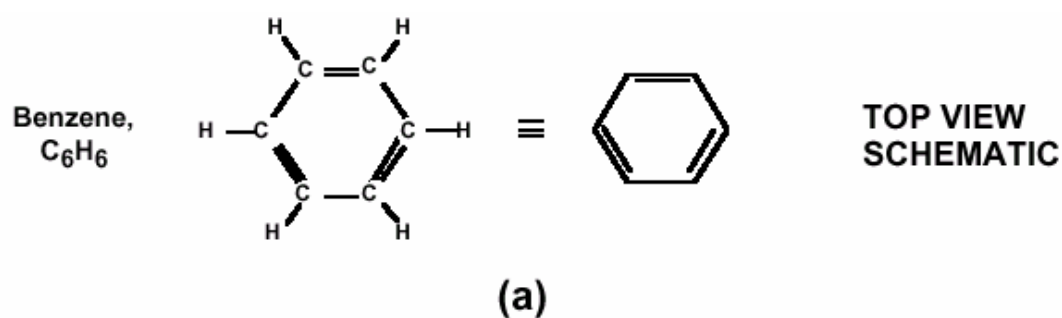


**Bifenilo:** Es un sólido blanco y cristalino. Su temperatura de fusión es de  $69^{\circ}\text{C}$ . Sus propiedades químicas son muy parecidas a las del benceno.

A continuación se presentan algunas cadenas moleculares aromáticas (conductoras) y otra alifática (aislante) tomadas de la Referencia [6]:



Aromatic Molecular Conductors and Aliphatic Molecular Insulators [6]



Benzene, Phenyl Groups, and  
the Structure and Function of Tour-type Polyphenylene-Based Molecular Wires [6]

La conductividad eléctrica de las cadenas “*polyphenylene*” se debe a los orbitales  $\pi$ .

En la síntesis de las moléculas del tipo “*polyphenylene*” se aprovecha la gran experiencia y conocimientos de los especialistas en química orgánica los que han estudiado y trabajado en la síntesis de compuestos orgánicos desde el siglo XIX. (El benceno fue descubierto por Faraday en 1825).