

## Capítulo 4: Características de diseño del memristor

Durante mayo del 2008, investigadores de Hewlett-Packard maravillaron al mundo de la electrónica al demostrar la existencia del cuarto elemento fundamental en un circuito eléctrico, con esto, cerrando una brecha en la teoría de circuitos eléctricos. Ahora, otros investigadores han creado nuevos tipos de memristors, cuyas características recaen en las propiedades magnéticas de los electrones, donde potencialmente se espera que estos circuitos sean fáciles de integrarse con los existentes actualmente. Durante este capítulo se expondrán los diferentes tipos de memristor y las tecnologías en las cuales se basa su construcción. Resulta impresionante observar los diferentes ramos en los cuales se desarrollan investigaciones pues características memristivas pueden encontrarse en muchos materiales o combinaciones creadas por el hombre.

### *4.1 - Memristor basado en $TiO_2$*

El interés por crear nuevos componentes memristivos ha cobrado auge entre investigadores y académicos, incluso el mismo Stanley Williams ha afirmado en diversas ocasiones que HP busca nuevos materiales para formar nuevos memristors. Resulta importante explicar y detallar la composición con la que se forma un memristor utilizando tecnología actual.

El primer material utilizado para construir uno, es el dióxido de titanio ( $TiO_2$ ). Durante el año 2008 se revivió, de una forma elocuente, el interés por el memristor. Un componente meramente teórico durante muchos años, por fin cobró vida cuando un grupo de investigadores de Hewlett Packard, liderados por Stanley Williams, reportó una versión experimental en estado sólido de un memristor. El tema no pudo ser puesto a un lado debido a la innovación y la magnitud que este tipo de descubrimientos conllevan. No olvidemos el invento del transistor en 1947 debido al ingenio de tres investigadores de Laboratorios Bell; las consecuencias ya se conocen pues el transistor es el elemento más importante dentro de la electrónica actual.

El artículo publicado por Williams y sus colegas, demostró que su dispositivo de estado sólido cumplía con las características que definen al memristor basándose en el comportamiento de películas delgadas a escalas nanométricas. Stan menciona que el dispositivo no usa el flujo magnético, como se menciona en la teoría de Chua, ni guarda su carga como lo haría un

capacitor. De manera diferente, el dispositivo conserva una dependencia a la resistencia debido al historial de la corriente que ha fluido por él.

Las gráficas  $i-v$  permiten identificar un sistema memristivo. Como antes se ha mencionado, muchos investigadores se habían topado con este típico, pero a la vez, confundible lazo. No fue hasta que Williams y su grupo de investigadores logró unir las piezas del rompecabezas y descubrir que todas aquellas interpretaciones guardaban algo más profundo, el cuarto elemento eléctrico propuesto por Leon O. Chua.

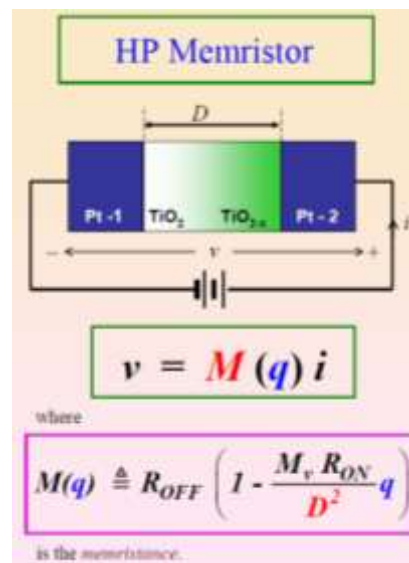


Figura 4.1 – Memristor de HP

La composición del memristor propuesto por HP resulta ser interesante, pues la receta correcta para descubrir este nuevo elemento eléctrico se tenía que buscar en pequeñas escalas, lo cual no se había realizado anteriormente. La estructura física del componente de HP, como se muestra en la figura 4.1, se compone por una delgada capa (50nm) formada por dióxido de titanio, envuelta entre dos electrodos con 5nm de espesor, uno diseñado con titanio (Ti) y otro con platino (Pt), o ambos con Pt, depende el diseño.

Inicialmente, hay dos capas de película de dióxido de titanio, una que ha sido levemente agotada de átomos de oxígeno. Los espacios dejados por el oxígeno toman el rol de portadores de carga, lo cual resulta en una menor resistencia en la capa con menos oxígenos. Al momento de aplicar un campo eléctrico a los materiales, los espacios sin oxígeno fluyen y se cambia la frontera entre

las capas de alta y baja resistencia; de esta forma se comprueba que la resistencia de la capa es totalmente dependiente de la cantidad de carga que ha pasado a través de ella en cierta dirección. Esto se muestra en la figura 4.2. Cabe mencionar que esto es reversible si se cambia el sentido de la corriente. En posteriores estudios se ha logrado reducir de 5nm a 3nm la capa de TiO<sub>2</sub>.

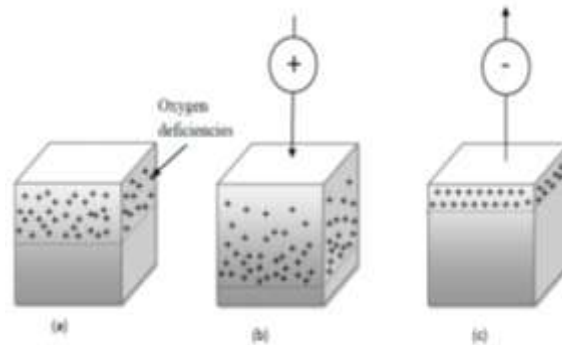


Figura 4.2 – Comportamiento del memristor cuando se le aplican voltajes de entrada positivos y negativos.

La memristancia solamente se despliega cuando ambas capas, la dopada y la agotada, contribuyen a la resistencia, como el caso explicado. Cuando suficiente corriente ha pasado a través del dispositivo y los iones no pueden moverse más, el dispositivo entra en histéresis. La integración de  $q = \int I dt$  cesa, pero la carga se mantiene en los límites superiores del lazo de histéresis. La variable  $M$  se mantiene constante, de esta manera el dispositivo ahora se comporta como una resistencia tradicional, hasta que la corriente circulando a través de él, circule en dirección inversa.

#### **4.2 - Memristor basado en Polímeros**

En Julio del año 2008, Victor Erokhin y Marco Fontana, afirmaron haber desarrollado un memristor polimérico, esto, tiempo antes del creado por HP. En su investigación denominada *Dispositivo polimérico controlado electroquímicamente: Memristor encontrado hace dos años*, ellos afirman que un dispositivo fue encontrado dos años antes que el demostrado por HP. En este documento se explica la funcionalidad y construcción del elemento, afirmando que el principio de funcionamiento está basado en la variación de conductividad electrónica en un delgado (50nm) polímero, llamado polianilina. La variación es inducida y regulada por el flujo

iónico dentro y fuera de la capa del polímero, la cual se encuentra en la unión con una película compuesta por un electrolito sólido (Óxido de polietileno dopado con litio).

Durante el año 2004, Krieger y Stuart Spitzer publicaron un paper durante el simposio *Non-Volatile Memory Technology*, de la IEEE. El documento describe el proceso de dopado de materiales basados en polímeros y dieléctricos inorgánicos, con el fin de mejorar las características de conmutación y retención requeridas para crear celdas de memoria no volátiles. En este paper se describe el uso de una capa especial, denominada como pasiva, colocada entre un electrodo y celdas de memoria no volátiles, lo cual mejora la extracción de iones desde el electrodo. Es posible usar conductores rápidos de ion como la capa pasiva, lo cual permite aminorar el campo de extracción iónico. El desarrollo de estas investigaciones se encuentra en etapas muy tempranas y se estudian nuevos materiales para mejorar el flujo de iones.

### ***4.3 - Memristores espintrónicos***

Poco tiempo después de que HP reveló al mundo su memristor, investigadores comenzaron a buscar esta propiedad en elementos espintrónicos. Esta área es relativamente nueva dentro del mundo de la electrónica. La espintrónica es el alma dentro de los más importantes avances en densidad de datos de discos duros y de memoria no volátil, conocida como RAM Magnetoresistiva (MRAM por sus siglas en inglés). Mientras la electrónica convencional funciona manipulando el movimiento de electrones, la espintrónica trabaja manipulando una propiedad cuanto-mecánica de los electrones, conocida como giro. El giro es la propiedad responsable por el magnetismo; los materiales son magnetizados cuando la mayoría de sus electrones tienen su dirección de giro apuntando hacia la misma dirección.

Recientemente, se ha encontrado que conjuntando memristors y espintrónica se pueden obtener dispositivos cuya resistencia cambia de acuerdo al giro de los electrones que pasan a través de este, obviamente estos dispositivos conservan su resistencia cumpliendo con la característica de un memristor.

Yiran Chen y Xiaobin Wang, investigadores en Seagate Technology, describieron tres ejemplos de posibles memristors magnéticos en la edición de la IEEE Electron Device Letters. En uno de estos ejemplos, la resistencia es causada por el movimiento circular de los electrones del dispositivo apuntando en una dirección diferente a la de otros electrones. Entonces se dice que se

crea una frontera entre los dos estados. El flujo de electrones posee cierto giro, lo cual altera el estado de magnetización del dispositivo. Por ende, cambiando el sentido de la magnetización, se alteran las fronteras y la resistencia del dispositivo. La velocidad de conmutación que se logra es del orden de picosegundos o microsegundos, según convenga a la aplicación. Por ejemplo, para leer un disco duro se necesitaría sentir los cambios del campo magnético en picosegundos, mientras que para un sensor de radiación bastaría con medir en el orden de microsegundos para un correcto muestreo de los datos.

#### ***4.4 - Modelo lineal de difusión propuesto en “The fourth element: Characteristics, Modelling and Electromagnetic Theory of the Memristor”***

Consideremos un campo eléctrico a través del dispositivo. Por lo tanto existe una relación lineal entre la velocidad de difusión del flujo y la red del campo eléctrico. La ecuación de estado puede ser descrita como se define en la ecuación 10.

$$\frac{1}{D} \frac{dw(t)}{dt} = \frac{R_{on}}{\beta} i(t) \quad (10)$$

Integrando la ecuación 10 se obtiene

$$\frac{w(t)}{D} = \frac{w(t_0)}{D} + \frac{R_{on}}{\beta} q(t) \quad (11)$$

Donde  $w(t_0)$  es la longitud inicial de  $w$ . La velocidad de difusión bajo un campo eléctrico uniforme a través del dispositivo es dada por

$$v_D = \frac{dw(t)}{dt} \quad (12)$$

En un campo uniforme  $D = v_D t$ . En este caso,  $Q_D = it$  define la cantidad de carga requerida para mover la frontera desde  $w(t_0)$ , donde  $w \rightarrow 0$ , hasta la distancia  $w(t_D)$ , donde  $w \rightarrow D$ . Por lo tanto  $Q_D = \frac{\beta}{R_{on}}$ , así substituyendo en la ecuación 11 tenemos

$$\frac{w(t)}{D} = \frac{w(t_0)}{D} + \frac{q(t)}{Q_D} \quad (13)$$

Si  $x(t) = \frac{w(t)}{D}$ , entonces la ecuación 13 puede reescribirse como

$$x(t) = x(t_0) + \frac{q(t)}{Q_D} \quad (14)$$

La cantidad de carga que ha pasado a través del canal sobre la carga requerida para un canal conductivo está dada por  $\frac{q(t)}{Q_D}$ . Usando las ecuaciones propuestas por Strukov, Snider, Steward y Williams en *The missing memristor found* se obtiene

$$v(t) = \left( R_{on} \frac{w(t)}{D} + R_{off} \left( 1 - \frac{w(t)}{D} \right) \right) i(t) \quad (15)$$

Substituyendo  $x(t) = \frac{w(t)}{D}$  en la ecuación 15 se obtiene

$$v(t) = \left( R_{on} x(t) + R_{off} (1 - x(t)) \right) i(t) \quad (16)$$

Si asumimos que la carga inicial  $q(t_0) = 0$ , entonces  $w(t) = w(t_0) \neq 0$  y

$$M_0 = R_{on}(x(t_0)) + r(1 - x(t_0)) \quad (17)$$

Donde  $r = \frac{R_{off}}{R_{on}}$  y  $M_0$  es el valor de memristancia en  $t_0$ . Así la memristancia en el tiempo  $t$  está dada por

$$M(q) = M_0 - \Delta R \left( \frac{q(t)}{Q_D} \right) \quad (18)$$

Donde  $\Delta R = R_{off} - R_{on}$ . Cuando  $R_{off} \gg R_{on}$ ,  $M_0 \approx R_{off}$

Si sustituimos la ecuación 18 en  $v(t) = M(q)i(t)$ , cuando  $i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$  se obtiene

$$v(t) = \left( M_0 - \Delta R \left( \frac{q(t)}{Q_D} \right) \right) \frac{dq(t)}{dt} \quad (19)$$

Ahora consideremos que  $M(q) = \frac{d\varphi(q)}{dq}$ , entonces la solución es

$$q(t) = \frac{Q_D M_0}{\Delta R} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{2\Delta R}{Q_D M_0^2} \varphi(t)}\right) \quad (20)$$

Para  $\Delta R \approx M_0 \approx R_{off}$ . La ecuación 20 es ahora

$$q(t) = Q_D \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2}{Q_D R_{off}} \varphi(t)}\right) \quad (21)$$

Si  $Q_D = \frac{D^2}{\mu_D R_{on}}$ , entonces el estado interno del memristor será

$$x(t) = 1 - \sqrt{1 - \frac{2\mu_D}{rD^2} \varphi(t)} \quad (22)$$

La relación  $i-v$  en este caso es

$$i(t) = \frac{v(t)}{R_{off} \left(\sqrt{1 - \frac{\mu_D}{rD^2} \varphi(t)}\right)} \quad (23)$$

La pasada ecuación muestra la relación cuadrática inversa entre la memristancia y el grosor  $D$  del  $\text{TiO}_2$ . Entonces para pequeños valores de  $D$ , la memristancias muestra características mejoradas. Actualmente la memristancia se vuelve más importante debido a que las dimensiones de los dispositivos electrónicos se vuelven cada vez más pequeños, llegando a escalas nanométricas.