

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**  
**COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**El futuro del almacenamiento de información: estudio de la tecnología de memorias resistivas basado en el modelo de contactos de punto cuántico**

**Jorge Esteban Moreno Lanas**

**Lionel Trojman, Ph.D., Director de Tesis**

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de Ingeniero  
Eléctrico/Electrónico.

Quito, enero 2014

**Universidad San Francisco de Quito  
Colegio de Ciencias e Ingeniería**

**HOJA DE APROBACION DE TESIS**

**El futuro del almacenamiento de información: estudio de la tecnología de memorias resistivas basado en el modelo de contactos de punto cuántico**

Jorge Esteban Moreno Lanas

Lionel Trojman, PhD. ....  
Director de Tesis

Luis Miguel Prócel, M.Sc. ....  
Miembro del Comité de Tesis

Nelson Herrera, Ing. ....  
Miembro del Comité de Tesis

Omar Aguirre, M.Sc. ....  
Director del Programa

Ximena Córdova, PhD. ....  
Decana de la Escuela de Ingeniería  
Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Quito, enero 2014**

## © DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma: \_\_\_\_\_

Nombre: Jorge Esteban Moreno Lanas

C. I.: 180346315-5

Lugar: Quito, enero 2014

## **DEDICATORIA**

A mis padres, a mi hermana y en especial a mis abuelos.

## **AGRADECIMIENTOS**

A todos aquellos que estuvieron junto a mí durante estos años de esfuerzo: familia, amigos y todos mis profesores.

## RESUMEN

Recientemente, el modelo basado en los contactos de punto cuántico (QPC) obtuvo resultados importantes al describir el mecanismo de conducción de memorias resistivas (RRAM) con dieléctricos de óxido de hafnio ( $\text{HfO}_2$ ). Este trabajo utiliza el modelo QPC para investigar dos aspectos importantes sobre la física de estas memorias: la dependencia del mecanismo de conducción con respecto a sus dimensiones y los efectos de su transistor de control.

De acuerdo con resultados experimentales se encontró que el mecanismo de conducción de las RRAM es independiente de sus dimensiones y que la influencia del transistor de control puede ser cancelada utilizando una polarización correcta. Además se halló que el voltaje de formación varía inversamente con las dimensiones de las memorias.

## ABSTRACT

Recently, the model based on the quantum point contacts (QPC) achieved important results for describing the conduction mechanism of  $\text{HfO}_2$ -based resistive random access memories (RRAM). This work makes a study of two important aspects related to the physics of these memories: a possible dependence of the RRAM conduction mechanism with respect to the scaling area and the influence of the compliance transistor.

According to experimental results it was found that the conduction mechanism of the RRAM memories is essentially independent of their scaling area and that the compliance transistor influence can be cancelled by applying the correct polarization. In addition, it was found that the forming voltage is inversely proportional to the cell area.

## TABLA DE CONTENIDO

|                                                                                                                                  |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Resumen .....</b>                                                                                                             | <b>7</b>  |
| <b>Abstract .....</b>                                                                                                            | <b>8</b>  |
| <b>1 INTRODUCCIÓN A LA TECNOLOGÍA DE MEMORIAS RESISTIVAS.....</b>                                                                | <b>13</b> |
| 1.1 Antecedentes y estructura básica de una memoria resistiva.....                                                               | 14        |
| 1.2 Conmutación resistiva .....                                                                                                  | 15        |
| 1.3 Nociones básicas del modelo QPC.....                                                                                         | 18        |
| 1.4 Áreas de análisis y objetivos sobre las memorias resistivas.....                                                             | 20        |
| <b>2 MODELO QPC Y DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL .....</b>                                                                             | <b>22</b> |
| 2.1 Estructura de las celdas utilizadas .....                                                                                    | 22        |
| 2.2 Teoría QPC aplicada a RRAM con dieléctricos de HfO <sub>2</sub> .....                                                        | 24        |
| 2.3 Metodología de Investigación .....                                                                                           | 30        |
| 2.3.1 Dependencia del mecanismo de conducción con respecto al área de las RRAM.....                                              | 30        |
| 2.3.2 Dependencia del mecanismo de conducción con respecto a las dimensiones del transistor de control. ....                     | 33        |
| 2.3.3 Voltaje de formación con respecto al área de las memorias y el transistor de control .....                                 | 34        |
| <b>3 ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS.....</b>                                                                                     | <b>36</b> |
| 3.1 Resultados de la dependencia del mecanismo de conducción con las dimensiones de las memorias .....                           | 36        |
| 3.2 Resultados de la dependencia del mecanismo de conducción con las dimensiones las dimensiones del transistor de control. .... | 42        |
| 3.3 Voltaje de formación con respecto al área de las memorias.....                                                               | 48        |
| 3.4 Voltaje de formación con respecto a las dimensiones las dimensiones del transistor de control. ....                          | 50        |
| <b>4 CONCLUSIONES.....</b>                                                                                                       | <b>53</b> |
| <b>REFERENCIAS .....</b>                                                                                                         | <b>55</b> |

## TABLAS

Tabla 2.1: Grupo de memorias utilizadas para determinar dependencia de mecanismo de conducción con el área de RRAM.

Tabla 2.2: Grupo de memorias utilizadas para determinar dependencia de mecanismo de conducción con el transistor de control.

## FIGURAS

Figura 1.1: Estructura de una memoria RRAM (Sawa, 2008)

Figura 1.2: Proceso de formación y estados resistivos de una RRAM (Sawa, 2008)

Figura 1.3: Cuantización de la conductancia en un Punto de Contacto Cuántico, en unidades de  $2e^2/h$  (Van Houten & Beenakker, 1996)

Figura 2.1: Diagrama esquemático de las RRAM estudiadas.

Figura 2.2: Diagrama de circuito de una RRAM con transistor de control (Waser et al., 2009)

Figura 2.3: Proceso de *reset* en una celda RRAM (Degraeve, 2010)

Figura 2.4: Modelo de un filamento conductivo considerado como contacto de punto cuántico (Prócel et al., 2013)

Figura 2.5: Esquema del transistor de control donde se especifican  $W$  y  $L$

Figura 2.6: Esquema del transistor de control donde se especifican  $W$  y  $L$  (Sze & Kwok, 2007).

Figura 3.1: Valores del parámetro  $\alpha$  con respecto al área de RRAM.

Figura 3.2: Valores del parámetro  $\Phi$  con respecto al área de RRAM.

Figura 3.3: Valores del parámetro  $t_B$  con respecto al área de RRAM.

Figura 3.4: Valores del parámetro  $r_B$  con respecto al área de RRAM.

Figura 3.5: Modelo de filamento cilíndrico dentro del dieléctrico de la RRAM.

Figura 3.6: Valores del parámetro  $\alpha$  con respecto a la longitud de canal del transistor de control para tres áreas de RRAM.

Figura 3.7:  $\Phi$  vs. longitud de canal de transistor de control.

Figura 3.8:  $r_B$  vs. Longitud de canal de transistor de control.

Figura 3.9:  $t_B$  vs. Longitud de canal de transistor de control.

Figura 3.10: Polarización de compuerta en función de la longitud de canal de transistor de control.

Figura 3.11: Voltaje de formación con respecto al área de las RRAM.

Figura 3.12: Voltaje de formación con respecto a la longitud de canal de transistor.

Figura 3.13: Corriente de formación con respecto a voltaje de compuerta  $V_G$ .

## DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

Varios términos técnicos relacionados con las memorias resistivas serán nombrados utilizando acrónimos por sus siglas en inglés. Esto se debe a que dichos términos pueden tener una traducción ambigua y a que se utilizan de esa manera dentro de la comunidad científica. Estos términos seguirán siendo mencionados usando acrónimos a lo largo de todo este trabajo. Para evitar confusiones es necesario listarlos y aclararlos. Un resumen de aquellos términos se especifica a continuación.

- RRAM: Memoria resistiva de acceso aleatorio (Resistive Random Access Memory).
- MIM: Estructura con disposición de capacitor, con un material aislante entre dos contactos metálicos. (Metal-Insulator-Metal).
- FP: Proceso de formación de filamentos conductivos en una RRAM (Forming Process)
- HRS: Estado de alta resistencia en una RRAM (High Resistive State).
- LRS: Estado de baja resistencia en una RRAM (Low Resistive State).
- Reset: Proceso mediante el cual una RRAM conmuta de LRS a HRS.
- Set: Proceso mediante el cual una RRAM conmuta de HRS a LRS.
- QPC: Teoría de contactos de punto cuántico (Quantum Point Contact).
- I-V: Curva de Corriente con respecto al Voltaje

## **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN A LA TECNOLOGÍA DE MEMORIAS RESISTIVAS**

En los últimos años, muchos de los grandes avances en tecnología de la información se atribuyen al desarrollo de memorias de acceso aleatorio no-volátiles de alta velocidad y de gran capacidad de almacenamiento (Sawa, 2008). Actualmente, la tecnología de memorias Flash es la más prominente y la que domina el mercado mundial. Esto se debe a su gran potencial de integración y bajos costos de producción (Waser, 2009). Sin embargo, los avances en cuanto a escalamiento en memorias Flash está llegando a un límite. Esto se debe a que los métodos convencionales de miniaturización se han llevado a fronteras físicas difíciles de superar (Sawa, 2008). Las memorias Flash han mostrado problemas de escalamiento al llegar a dimensiones menores a los 20nm (Govoreanu, 2001).

Como respuesta a los límites físicos en la fabricación de memorias Flash, han surgido nuevas tecnologías de memorias no volátiles; entre ellas la tecnología de memorias resistivas (RRAM) ha atraído gran atención de investigadores y de la industria. Esto se debe a que se cree que son una de las opciones más adecuadas para reemplazar a las actuales memorias Flash. Es decir, las RRAM se consideran como el futuro de las memorias no volátiles (Prócel et al, 2013). Ese es el principal incentivo para desarrollar este trabajo, que busca analizar en detalle muchas propiedades y características de las RRAM.

## 1.1 Antecedentes y estructura básica de una memoria resistiva.

La investigación sobre la tecnología de memorias resistivas, se ha venido desarrollando desde hace más de una década (Prócel et al, 2013). Las RRAM figuran como fuertes candidatas para convertirse en la nueva generación de memorias no volátiles, debido a características de alta velocidad de conmutación, bajos voltajes de operación, gran potencial de escalamiento y compatibilidad con procesos CMOS (Miranda et al, 2010)

Este tipo de memorias se basa en el almacenamiento de información a través de cambios de nivel de resistencia eléctrica, que se codifican como información binaria (Waser, 2009). Las memorias resistivas utilizan materiales no convencionales en su estructura, como óxidos metálicos y componentes orgánicos, que exhiben fenómenos de conmutación resistiva (Sawa, 2008).

Las memorias RRAM presentan una estructura basada en la disposición de un capacitor: con un material aislante, ubicado entre dos electrodos metálicos (Sawa, 2008). Este tipo de estructuras se conoce como MIM, por sus siglas en inglés *Metal-Insulator-Metal*. Los cambios de resistencia eléctrica se producen en el material dieléctrico al aplicar distintos pulsos de voltaje entre sus contactos metálicos. En la Figura .1 se ilustra la estructura de una RRAM genérica.

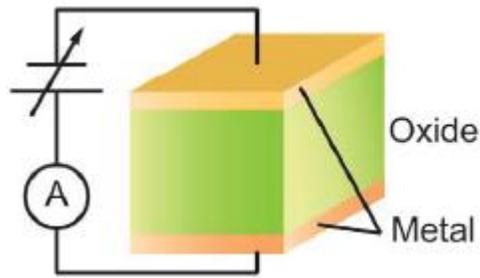


Figura 3.1: Estructura de una memoria RRAM (Sawa, 2008)

A pesar de que la tecnología RRAM se ha estudiado extensivamente, muchos de los fenómenos que rigen su comportamiento aún no pueden explicarse. Un sinnúmero de investigadores han formulado complejos modelos físicos y eléctricos para modelar su comportamiento; sin embargo, ninguno ha obtenido resultados concluyentes (Miranda, 2010).

Recientemente, un modelo basado en la teoría de los contactos de punto cuántico (*Quantum Point Contacts*, QPC) ha tenido éxito en describir la física de memorias resistivas fabricadas a partir de un dieléctrico de óxido de hafnio ( $\text{HfO}_2$ ). Este trabajo pretende analizar varios puntos (que serán detallados más adelante) sobre el mecanismo de conducción de memorias basadas en dieléctricos de  $\text{HfO}_2$  utilizando el modelo QPC.

## 1.2 Conmutación resistiva.

Las memorias RRAM poseen la importante característica de poder cambiar y mantener estables dos estados de resistencia eléctrica; uno denominado estado de alta resistencia (*High Resistive State*, HRS) y otro denominado estado de baja resistencia (*Low Resistive State*, LRS) (Waser, 2009). Este es el principio de funcionamiento de las celdas RRAM como memorias.

El proceso de conmutación en una memoria RRAM comienza cuando a una celda virgen, es decir que no ha sido expuesta a ningún campo eléctrico, se le aplica un voltaje (Sawa, 2008). Este voltaje ocasiona una ruptura dentro del material dieléctrico, que crea una trayectoria idónea para la conducción eléctrica. Esta acción se denomina proceso de formación (PF). Una vez que dicha trayectoria conductiva ha sido creada, los cambios de resistencia eléctrica se producen debido a la “apertura” y “cierre” de la misma por la aplicación de voltajes (Degraeve, 2010).

El proceso completo de conmutación puede explicarse en tres pasos simples (ver Figura 1.2):

- i) Se forma una trayectoria conductiva aplicando un voltaje: se denomina proceso de formación. La memoria adquiere un estado de baja resistencia eléctrica o LRS.
- ii) Se aplica un voltaje distinto para que la trayectoria de conducción se “cierre” y la memoria conmute de LRS a HRS. Esta etapa se denomina *reset*.
- iii) Se vuelve a aplicar un voltaje a la memoria para que la trayectoria conductiva vuelva a “abrirse” y se conmuta otra vez hacia el LRS. Este proceso se conoce como *set*.

De acuerdo a las características de voltaje que una RRAM necesita para conmutar, se las puede clasificar en dos tipos: unipolar y bipolar. En la conmutación unipolar, el cambio de resistencia depende de la amplitud del voltaje aplicado. Es decir, una celda con

comportamiento unipolar cambiará entre LRS y HRS cuando se aplique una amplitud de voltaje definida; sin que la polaridad del voltaje sea importante. Este comportamiento ha sido encontrado principalmente en celdas fabricadas a partir de óxidos con alto aislamiento eléctrico, como los óxidos metálicos binarios (Sawa, 2008).

Por otro lado, el comportamiento de conmutación bipolar muestra dependencia en la polaridad del potencial eléctrico aplicado. En otras palabras, una celda bipolar cambiará direccionalmente entre LRS y HRS dependiendo del sentido de la corriente que fluye por el dispositivo (Sawa, 2008). Durante este trabajo se analizarán celdas con conmutación bipolar.

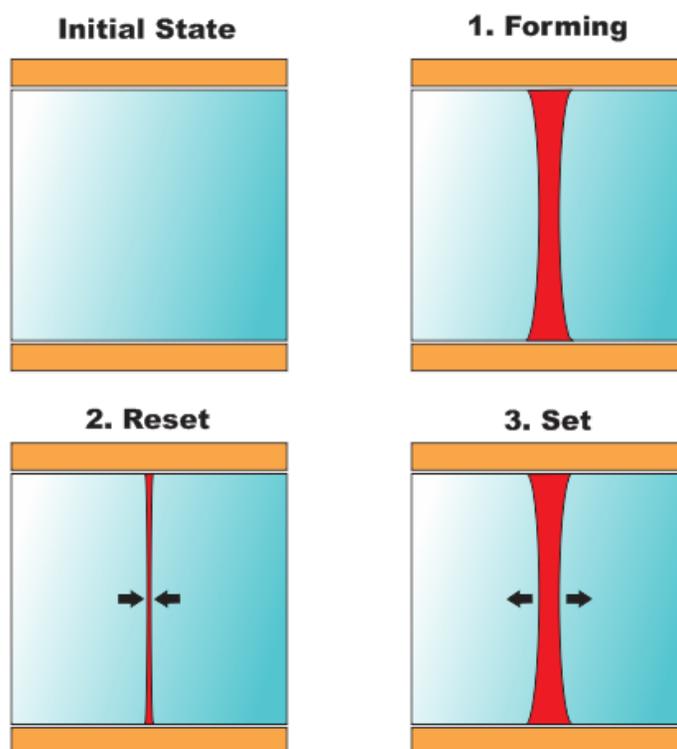


Figura 1.4: Proceso de formación y estados resistivos de una RRAM (Sawa, 2008)

Las características de conmutación en las RRAM dependen fuertemente de los materiales en su estructura y se ha encontrado que los mecanismos de conducción varían en relación con el material de su dieléctrico. Por esta razón no se ha encontrado un único modelo que describa a todos los tipos de RRAM (Prócel, 2013).

### **1.3 Nociones básicas del modelo QPC.**

En el año de 1957 el célebre científico Rolf Landauer propone un nuevo enfoque para explicar la conducción eléctrica. Para Landauer la conducción implicaba transmisión; es decir, la conducción eléctrica estaba estrechamente relacionada con la probabilidad de transmisión de electrones (Van Houten, 1996).

Landauer desarrolló una teoría que describía la relación entre la conducción eléctrica y la probabilidad de transmisión de electrones; que daría lugar a un nuevo campo de estudio: el transporte balístico cuántico (Van Houten, 1996). La historia del transporte balístico se remonta al año 1965, cuando el científico ruso Yuri Sharvin, usó un par de contactos puntuales (point contacts) para transmitir y detectar un haz de electrones que se desplazaba dentro de un metal mono-cristalino (Van Houten, 1996). En estos experimentos las propiedades ondulatorias de los electrones no jugaban un papel fundamental, puesto que la longitud de onda de Fermi del metal ( $\lambda \approx 0.5$  nm) era mucho menor que la separación entre los contactos puntuales (Van Houten, 1996).

Posteriormente, varios investigadores comenzaron a realizar experimentos similares empleando contactos puntuales en materiales semiconductores. En un dispositivo semiconductor, la longitud de onda de Fermi llega a ser cientos de veces mayor a la de un

metal; lo que brinda la posibilidad de estudiar una constricción con dimensiones comparables a la longitud de onda de Fermi. Este tipo de constricción se llegó a denominar: contacto de punto cuántico (QPC). El modelo QPC está basado directamente en la teoría creada por Landauer.

Se ha descubierto que dentro de un contacto de punto cuántico, la conductancia presenta valores cuantizados. Estos valores varían en dependencia del voltaje aplicado en pasos cercanos a múltiplos de  $G_0 = 2e^2/h \approx 1/13 \text{ k}\Omega$ ; que se entiende como una unidad de conductancia cuántica (Van Houten, 1996).

La Figura 1.3 ilustra resultados obtenidos al graficar la conductancia con respecto al voltaje variable en un contacto de punto cuántico. Claramente se observan los pasos de cuantización en múltiplos de  $2e^2/h$  (Van Wess, 1988).

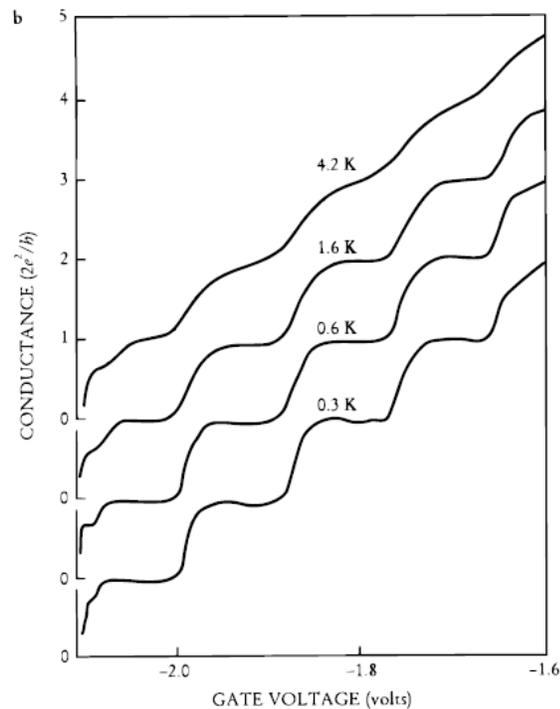


Figura 1.5: Cuantización de la conductancia en un Punto de Contacto Cuántico, en unidades de  $2e^2/h$  (Van Houten & Beenakker, 1996)

La teoría QPC intenta explicar el comportamiento de los electrones dentro de un contacto de punto cuántico. La importancia de la teoría QPC para esta investigación reside en la posibilidad de describir a las trayectorias conductivas formadas en las RRAM como contactos de punto cuántico. Existiendo además la posibilidad de definir al mecanismo de conmutación de las RRAM como la modulación del ancho del contacto de punto cuántico.

#### **1.4 Áreas de análisis y objetivos sobre las memorias resistivas.**

La atención de este proyecto se centra en memorias constituidas por óxido de Hafnio como aislante; para las cuales el modelo QPC ha mostrado excelentes resultados (Prócel, 2013). A pesar de que dicho modelo ya se ha aplicado ampliamente; una gran cantidad de aspectos sobre el comportamiento de estas memorias aún son poco claros. De ahí nace el principal objetivo de este trabajo: desarrollar un estudio del mecanismo de conducción de las RRAM con dieléctrico de  $\text{HfO}_2$ , utilizando el modelo QPC. Dicho estudio incluye tres aspectos principales, explicados en los siguientes párrafos.

En primer lugar, se pretende llevar a cabo un estudio para determinar si las dimensiones de las memorias afectan de alguna manera su mecanismo de conducción. Para esto, se analizan y comparan los valores de los parámetros del modelo QPC (definidos en el capítulo 2) entre memorias con distintas dimensiones.

Como segundo punto, se estudian los efectos que el escalamiento del transistor de control, conectado a las memorias, pueda tener sobre su mecanismo de conducción. El estudio implica nuevamente comparar los valores de los parámetros QPC para transistores con distintas dimensiones.

Finalmente, se llevará a cabo una observación de los efectos de las dimensiones de las memorias y de las dimensiones del transistor de control sobre el voltaje de formación en celdas vírgenes. Todos los análisis se realizan a partir de curvas I-V experimentales empleando un enfoque estadístico.

## CAPÍTULO 2: MODELO QPC Y DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL

Durante este capítulo se definen las características de las memorias utilizadas, junto con los detalles del modelo QPC que es utilizado para describir su mecanismo de conducción. Además, se establece la descripción experimental empleada para cumplir los objetivos de este trabajo.

### 2.1 Estructura de las celdas utilizadas.

Las celdas de memoria empleadas poseen un dieléctrico de óxido de hafnio; con contactos metálicos fabricados a base de titanio y hafnio. Las celdas tienen las siguientes características y dimensiones concretas: TiN(30 nm)\HfO<sub>2</sub>(5 nm)\Hf(10 nm)\TiN(30 nm). La Figura 2.1 brinda un esquema de estas memorias.

En los últimos años, las RRAM construidas en base a un aislante de óxido de hafnio (HfO<sub>2</sub>) han generado gran atención debido a que este material es superior (tecnológicamente) a otros materiales por su alta permitividad eléctrica y gran capacidad de integración. El HfO<sub>2</sub> ha sido utilizado ampliamente en la fabricación de dispositivos MOS (Gonon et al., 2010).

Las celdas RRAM utilizadas incluyen un transistor conectado en serie con las memorias. La tarea de este transistor es la de limitar y controlar la corriente que es entregada a la RRAM. Un esquema simple del circuito de una celda RRAM se muestra en la Figura 2.2.

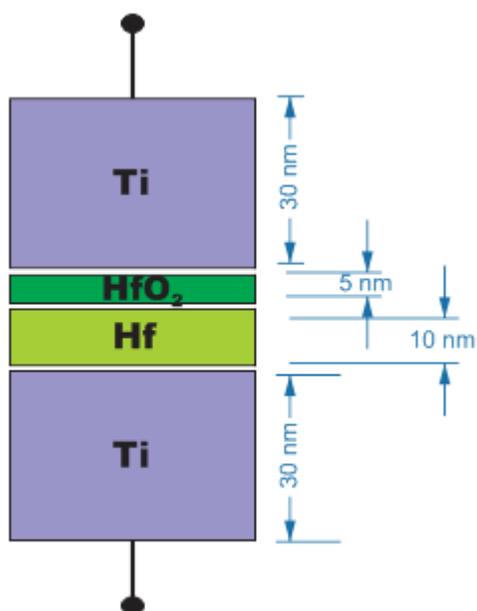


Figura 2.6: Diagrama esquemático de las RRAM estudiadas.

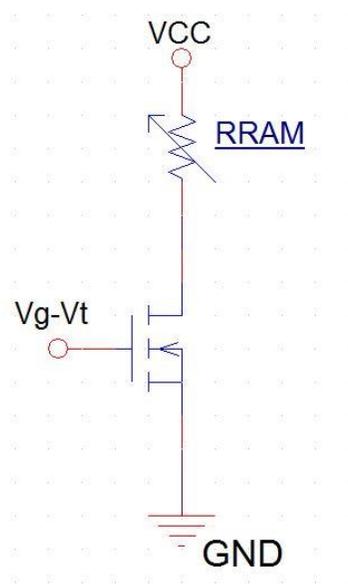
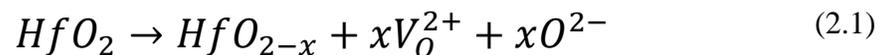


Figura 2.7: Diagrama de circuito de una RRAM con transistor de control (Waser et al., 2009)

## 2.2 Teoría QPC aplicada a las RRAM con dieléctricos de HfO<sub>2</sub>.

Muchos modelos se han propuesto para describir el mecanismo de conducción de las RRAM, tales como: corrientes limitadas por cargas, campos impulsados por transiciones metal-aislante de *Mott* y modificaciones de barreras *Schottky* en los electrodos; pero ninguno ha logrado resultados concluyentes (Gonon et al., 2010). Con referencia a las memorias fabricadas con un aislante de HfO<sub>2</sub>, el modelo basado en contactos de punto cuántico (QPC) ha obtenido resultados positivos. Este modelo ha tenido éxito debido a que usa parámetros con significado físico claro y que pueden ser fácilmente extraídos de curvas experimentales (Prócel, 2013).

El modelo QPC predice la formación de filamentos conductivos al aplicar un voltaje a la memoria RRAM (Gonon et al., 2010). Se cree que la formación de dichos filamentos se debe a la migración de cationes y aniones en el dieléctrico, donde al parecer la deriva de vacancias de oxígeno juega un papel determinante (Miranda et al., 2010). Un mecanismo ampliamente aceptado predice que los filamentos se forman cuando se extrae oxígeno del HfO<sub>2</sub>, hacia el ánodo, aplicando un voltaje. De esta forma se dejan vacancias de oxígeno ( $V_O^{2+}$ ), que son atraídas hacia el cátodo, y iones de oxígeno ( $O^{2-}$ ) dentro del dieléctrico (Gonon et al., 2010). Es decir, se da lugar a un proceso de reducción, que se entiende a partir de la ecuación (2.1):



En este proceso, se crean filamentos que contienen vacancias de oxígeno (por lo tanto tendrían propiedades metálicas). Los filamentos crecen desde el cátodo hacia el ánodo (Gonon et al., 2010).

La conmutación resistiva se atribuye a una modulación del ancho de estos filamentos. La diferencia en los niveles de corriente entre HRS y LRS se debería a un “ensanchamiento” o una “contracción” de los filamentos conductivos (Degraeve et al., 2012). La Figura 2.3 brinda una explicación de esta hipótesis, representando el proceso de *reset* (cambio de LRS a HRS; el proceso de *set* es su inverso) (Degraeve et al., 2010).

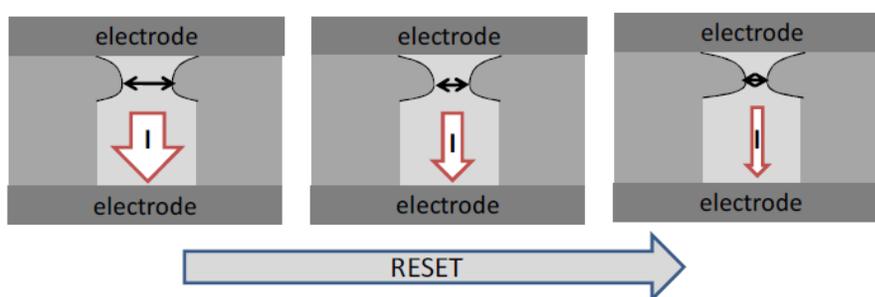


Figura 2.8: Proceso de *reset* en una celda RRAM (Degraeve, 2010)

Los filamentos se tratan como contactos de punto cuántico de tres dimensiones, cuya zona más estrecha se modela de la forma expuesta en la Figura 2.4 (Prócel et al., 2013). En este modelo se distingue una barrera de potencial producida por la cuantización del momentum de los electrones que la atraviesan. La diferencia entre los estados resistivos (HRS y LRS) se modela como el cambio en la altura de la barrera de potencial, traducido en la modulación del ancho del filamento.

En la Figura 2.4 el parámetro  $E_F$  corresponde a la energía de Fermi en la ventana de energía considerada ( $eV$ ),  $V$  es el voltaje aplicado,  $e$  es la carga del electrón,  $I$  es la corriente que fluye en el filamento,  $R$  es una resistencia parásita externa a la memoria,  $\Phi$  es la altura de la barrera de potencial y  $t_B$  es el ancho de la barrera de potencial en la energía de referencia  $E_F$ . La resistencia parásita  $R$  se incluye debido a las pérdidas en corriente presentes principalmente en el proceso de conmutación.

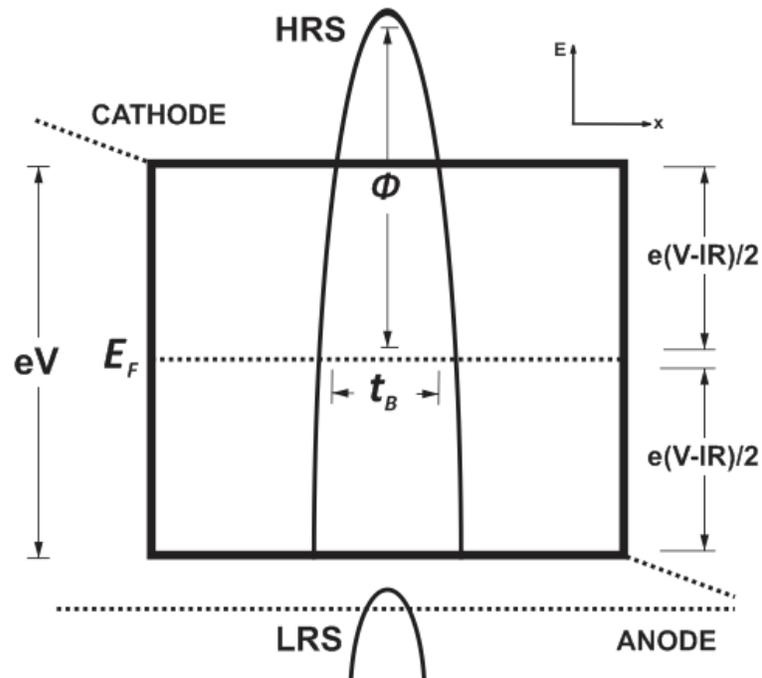


Figura 2.9: Modelo de un filamento conductivo considerado como contacto de punto cuántico (Prócel et al., 2013)

Asumiendo que la corriente fluye por el filamento conductivo, ubicado entre dos reservorios de electrones, la teoría de Landauer provee una expresión para la corriente

(Miranda et al., 2010). Teniendo en cuenta una temperatura cercana al cero absoluto y un voltaje aplicado finito, dicha expresión se puede apreciar en la ecuación (2.2).

$$I = \frac{2e}{h} \int T(E) dE$$

$$I = \frac{2e}{h} \int_{-e(V-IR)/2}^{e(V-IR)/2} \{1 + \exp[-\alpha(E - \Phi)]\}^{-1} dE \quad (2.2)$$

Donde  $T(E)$  es la probabilidad de transmisión de electrones en el sistema con una barrera de potencial en forma de parábola invertida,  $E$  es la energía de los electrones,  $\alpha$  es una constante relacionada con la forma de la barrera de potencial y  $h$  es la constante de Planck ( $6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ ) (Miranda et al., 2010).

Por simplicidad se supone que la caída de potencial en los contactos metálicos no afecta de ninguna manera a la altura de la barrera de potencial  $\Phi$ . Además, se propone una forma parabólica para la barrera de potencial debido a que se tiene una expresión continua y derivable para la probabilidad de *tunneling* de electrones (Miranda & Suñé, 2001).

Se obtiene una ecuación general para la corriente integrando la ecuación (2.2) en los límites de energía planteados. El resultado da lugar a la ecuación (2.3).

$$I = \frac{2e}{h} \left\{ e(V - IR) + \frac{1}{\alpha} \ln \left[ \frac{1 + \exp\{\alpha[\Phi - e(V - IR)/2]\}}{1 + \exp\{\alpha[\Phi + e(V - IR)/2]\}} \right] \right\} \quad (2.3)$$

Debido a la presencia de la resistencia externa  $R$ , esta ecuación es implícita para la corriente y no puede ser resuelta analíticamente para el voltaje  $V$ . Pero las memorias resistivas presentan dos estados bien identificados para la corriente, lo que permite que esta ecuación pueda analizarse por separado para HRS y LRS.

En HRS se asume que la barrera de potencial está por encima de la ventana de energía definida en la Figura 2.4, por lo que es posible considerar que  $V \gg IR$ . Así se reduce la ecuación (2.3) a la forma dada en (2.4) (Miranda et al., 2010):

$$I_{HRS} = \frac{2e}{h} \left\{ eV + \frac{1}{\alpha} \ln \left[ \frac{1 + \exp \left\{ \alpha \left[ \Phi - \frac{eV}{2} \right] \right\}}{1 + \exp \left\{ \alpha \left[ \Phi + \frac{eV}{2} \right] \right\}} \right] \right\} \quad (2.4)$$

Se obtiene una expresión mucho más simple para la corriente en HRS. Luego, en el caso del estado LRS se observa que la barrera de potencial no tiene un papel determinante en la conducción de cargas. Ya que no existe El transporte de electrones puede asumirse como balístico y se tiene una probabilidad de transmisión de  $T(E) \approx 1$  (Miranda et al., 2010). Reemplazando en (2.2) se obtiene:

$$I_{LRS} = \frac{G_0}{1 + G_0 R} V \quad (2.5)$$

Donde  $G_0$  es la unidad de conductancia cuántica, ya mencionada en el Capítulo 1 con un valor de  $G_0 = 2e^2/h \approx 1/13K\Omega$ .

El modelo también nos brinda una ecuación que relaciona al parámetro  $\alpha$  con el ancho de la barrera de potencial  $t_B$  y con  $\Phi$  en HRS; dada en (2.6).

$$\alpha = t_B \pi^2 \frac{\sqrt{2m^*/\Phi}}{h} \quad (2.6)$$

Donde  $m^*$  es la masa efectiva del electrón dentro del  $\text{HfO}_2$ . Este valor se midió experimentalmente dando un aproximado de  $m^* \approx 0.44m_0$  ( $m_0$  es la masa del electrón libre) (Zheng et al., 2007).

Otro parámetro importante para el modelo es el ancho de los filamentos conductivos en su punto más estrecho en HRS. Debido a que los filamentos son tratados como contactos de punto cuántico, es posible considerar un fenómeno de confinamiento de potencial con paredes laterales; es decir un pozo infinito de potencial. Del primer valor propio de un pozo infinito de potencial, este radio se puede calcular con la ecuación (2.7) (Miranda et al., 2010).

$$r_B = \frac{hz_0}{2\pi} \sqrt{2m^*\Phi} \quad (2.7)$$

Donde  $r_B$  es el radio de la constricción y  $z_0 = 2.404$  es el primer cero de la función de Bessel  $J_0$  (Miranda et al., 2010). Se observa una dependencia directa de  $r_B$  con la altura de la barrera de potencia  $\Phi$ .

Miranda et al. (2010) obtuvo valores para  $r_B$  y  $t_B$  en los siguientes rangos:  $0.3 \text{ nm} < r_B < 0.6 \text{ nm}$  y  $1.1 \text{ nm} < t_B < 2.3 \text{ nm}$  respectivamente. Estos valores son consistentes con el enfoque que requiere utilizar análisis cuánticos y no clásicos.

Hay que señalar que el valor de  $m^*$  utilizado en los cálculos corresponde al  $\text{HfO}_2$ . Pero ya que los filamentos conductivos se consideran como metálicos, es decir compuestos sólo de Hf, es posible que este valor de masa efectiva tenga una influencia importante en los

resultados. Sería interesante para trabajos futuros comparar los valores de  $r_B$  y  $t_B$  utilizando la masa efectiva del Hf.

## **2.3 Metodología de Investigación.**

Luego de que se han explicado los pormenores sobre la estructura de las RRAM y el modelo QPC, es necesario exponer la metodología experimental utilizada para cumplir los objetivos de esta tesis. Hay que recordar que los aspectos de investigación abordados son: el estudio de una posible influencia de las dimensiones de las memorias y el transistor de control sobre su mecanismo de conducción y el análisis del voltaje de formación.

### **2.3.1 Dependencia del mecanismo de conducción con respecto al área de las RRAM.**

En primer lugar, se pretende investigar la influencia de las dimensiones de las memorias sobre su mecanismo de conducción. Para llevar a cabo este análisis se pretende extraer los parámetros  $\Phi$ ,  $\alpha$ ,  $r_B$  y  $t_B$  para memorias con distinta área y comparar sus valores. Estos parámetros se extraen de las curvas en el estado HRS. La finalidad de este análisis es observar si la conducción de electrones es afectada de alguna manera por las dimensiones de las RRAM.

El análisis se llevará a cabo para 4 tipos de celda con área distinta; definidas en la Tabla 2.1. Para estos 4 tipos de celda las dimensiones del transistor de control son iguales. Se analizan 15 memorias por cada área. En cada una de las memorias se realiza primeramente el proceso de formación y luego se llevan a cabo 10 ciclos de *set / reset*.

En cada ciclo de conmutación se obtiene una curva I-V para HRS y una curva I-V para LRS. Como se analizan 15 memorias y se realizan 10 ciclos de conmutación se obtienen 150 curvas experimentales en HRS y 150 curvas en LRS. En todos los casos se utilizarán los valores de la media y la desviación estándar para expresar la estadística de los resultados.

| DISPOSITIVO | ÁREA DE RRAM |        | ÁREA DE TRANSISTOR |        |
|-------------|--------------|--------|--------------------|--------|
|             | W [nm]       | L [nm] | W [um]             | L [um] |
| <b>1</b>    | 55           | 55     | 1                  | 1      |
| <b>2</b>    | 85           | 85     | 1                  | 1      |
| <b>3</b>    | 105          | 105    | 1                  | 1      |
| <b>4</b>    | 135          | 135    | 1                  | 1      |

Tabla 2.1: Grupo de memorias utilizadas para determinar dependencia del mecanismo de conducción con el área de RRAM.

Las dimensiones llamadas  $W$  y  $L$  corresponden a las mostradas en la Figura 2.5 para las memorias y a la Figura 2.6 para los transistores. En el caso del transistor se debe notar que la dimensión  $L$  corresponde a la longitud del canal.

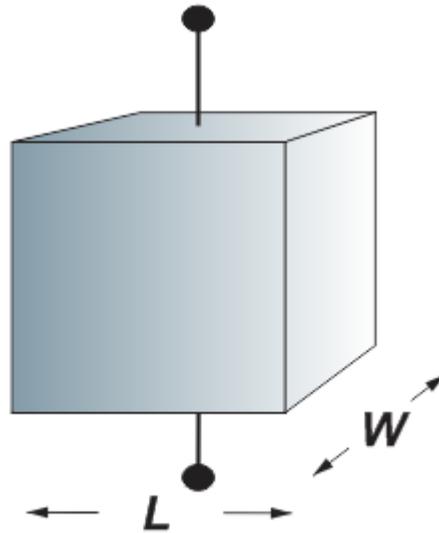


Figura 2.5: Esquema del transistor de control  
donde se especifican  $W$  y  $L$

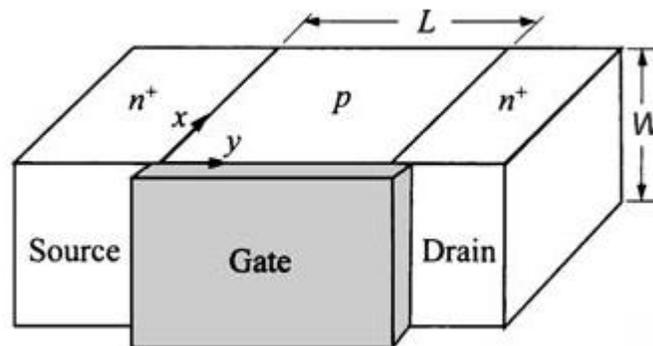


Figura 2.6: Esquema del transistor de control  
donde se especifican  $W$  y  $L$  (Sze & Kwok, 2007).

### 2.3.2 Dependencia del mecanismo de conducción con respecto a las dimensiones del transistor de control.

Como segundo punto, se pretende estudiar los efectos de las dimensiones del transistor de control sobre el mecanismo de conducción de las memorias. En este caso se realiza una comparación de los parámetros QPC para distintas dimensiones longitudes de canal  $L$  del transistor. Para este conjunto de experimentos se utilizará un grupo de memorias distinto, listado en la Tabla 2.2.

En la Tabla 2.2 se distinguen 3 grupos de celdas con igual área de RRAM y distintas longitudes de canal de transistor  $L$ . El área de RRAM se mantiene constante y se comparan los resultados entre las tres longitudes de canal distintas. Se utilizan 15 celdas de cada tipo, en las cuales se realizan 10 ciclos de *set/reset*. Esto nos brinda un total de 150 curvas I-V para cada estado resistivo para cada tipo de celda.

| DISPOSITIVO | ÁREA DE RRAM |        | ÁREA DE TRANSISTOR |              |
|-------------|--------------|--------|--------------------|--------------|
|             | W [nm]       | L [nm] | W [ $\mu$ m]       | L [ $\mu$ m] |
| 1           | 55           | 55     | 0.11               | 0.07         |
| 2           | 55           | 55     | 0.11               | 0.13         |
| 3           | 55           | 55     | 0.11               | 1            |
| 4           | 85           | 85     | 0.13               | 0.07         |
| 5           | 85           | 85     | 0.13               | 0.13         |
| 6           | 85           | 85     | 0.13               | 1            |
| 7           | 135          | 135    | 0.17               | 0.07         |
| 8           | 135          | 135    | 0.17               | 0.13         |
| 9           | 135          | 135    | 0.17               | 1            |

Tabla 2.2: Grupo de memorias utilizadas para determinar dependencia de mecanismo de conducción con el transistor de control.

### **2.3.3 Voltaje de formación con respecto al área de las memorias y el transistor de control.**

Los valores de voltaje de formación son cruciales para obtener memorias con conmutación estable (Degraeve et al, 2012). Por esta razón, es importante entender cómo influyen las dimensiones de las memorias y el transistor de control sobre voltaje de formación.

En primer lugar se analizarán los valores del voltaje de formación entre distintas áreas de RRAM. Para este análisis se utilizarán las memorias listadas en la Tabla 2.1. Para cada área se utilizaron 15 memorias, en las cuales se realiza el proceso de formación. Es decir se obtienen 15 valores de voltaje de formación por área. De estos datos se encuentran los valores medios y se comparan.

Luego se estudiará la influencia de las dimensiones de transistor de control sobre los valores del voltaje de formación. Para esto se comparan los valores de voltaje de formación entre transistores con distinta longitud de canal  $L$ .

En este caso se emplean las celdas de la Tabla 2.2, donde se especifican 3 grupos de celdas con igual área de RRAM y 3 distintas longitudes de canal de transistor. Se comparan los valores del voltaje de formación entre las tres distintas longitudes de canal. Para cada tipo de celda se utilizan 15 memorias, por lo tanto se tienen 15 datos de voltaje de formación por cada área que. De estos datos se hallan los valores medios y se comparan.

Varias publicaciones como la de Degraeve et al. (2012) mencionan que se necesitan rangos específicos de voltaje y corriente para conseguir una conmutación estable en las RRAM. Las condiciones de estabilidad halladas por Degraeve et al (2012) determinaron un

rango en el cual debe ubicarse la corriente de formación. Se determinó un rango de  $10\mu\text{A} < I_{\text{FORM}} < 100\mu\text{A}$ . Estas condiciones serán utilizadas en todos los experimentos, donde los niveles de corriente son controlados mediante el transistor de control.

## CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS

Este capítulo se dedica a la presentación de los resultados experimentales encontrados, junto con su respectivo análisis. Todos los resultados se presentan en forma de gráficos para hacer fácil su comprensión.

### **3.1 Resultados de la dependencia del mecanismo de conducción con las dimensiones de las memorias.**

Durante esta sección se presentan los resultados de comparar los valores de los parámetros  $\alpha$ ,  $\Phi$ ,  $t_B$  y  $r_B$  con respecto a las distintas áreas de memoria analizadas. Se debe recordar que los dispositivos utilizados se detallan en la Tabla 2.1.

Los resultados se presentan como gráficos de cada parámetro en función del área de las memorias. Los valores graficados corresponden a la media de los 150 datos obtenidos y las desviaciones estándar se muestran como barras de error en cada gráfico.

Los resultados pueden observarse en las figuras 3.1 a 3.4. La Figura 4.1 muestra los valores del parámetro  $\alpha$  comparado con las cuatro áreas de RRAM estudiadas. No se observan variaciones significativas; la diferencia de los valores para cada área de memoria son mínimas. Se puede determinar la misma conclusión para los parámetros  $\Phi$ ,  $t_B$  y  $r_B$ ; cuyos resultados se muestran en las figuras 3.2, 3.3 y 3.4 respectivamente. En todos los casos la dependencia del área es casi nula.

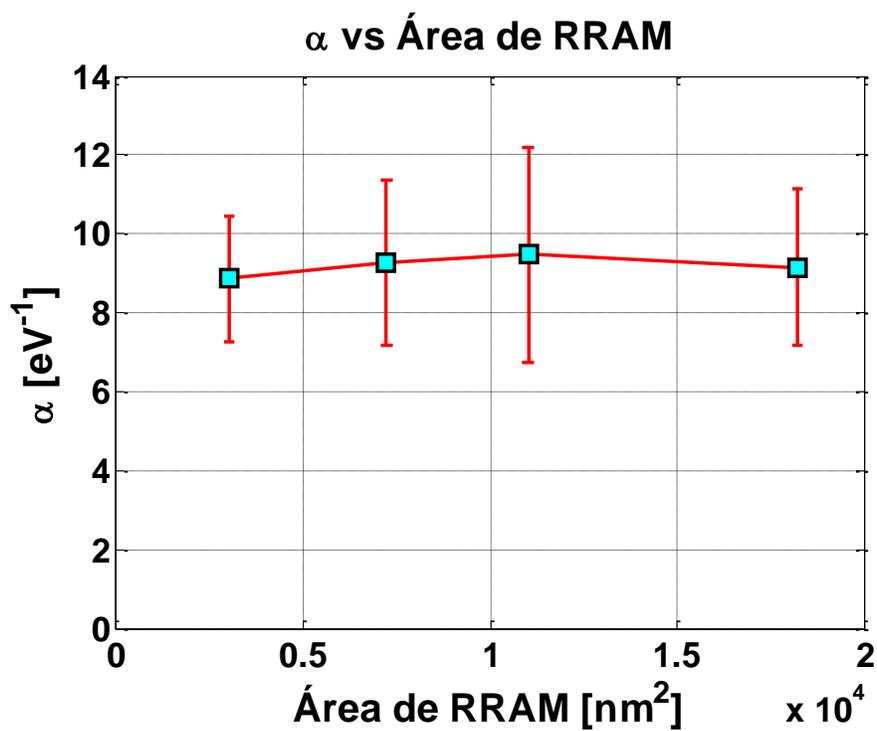


Figura 3.10: Valores del parámetro  $\alpha$  con respecto al área de RRAM.

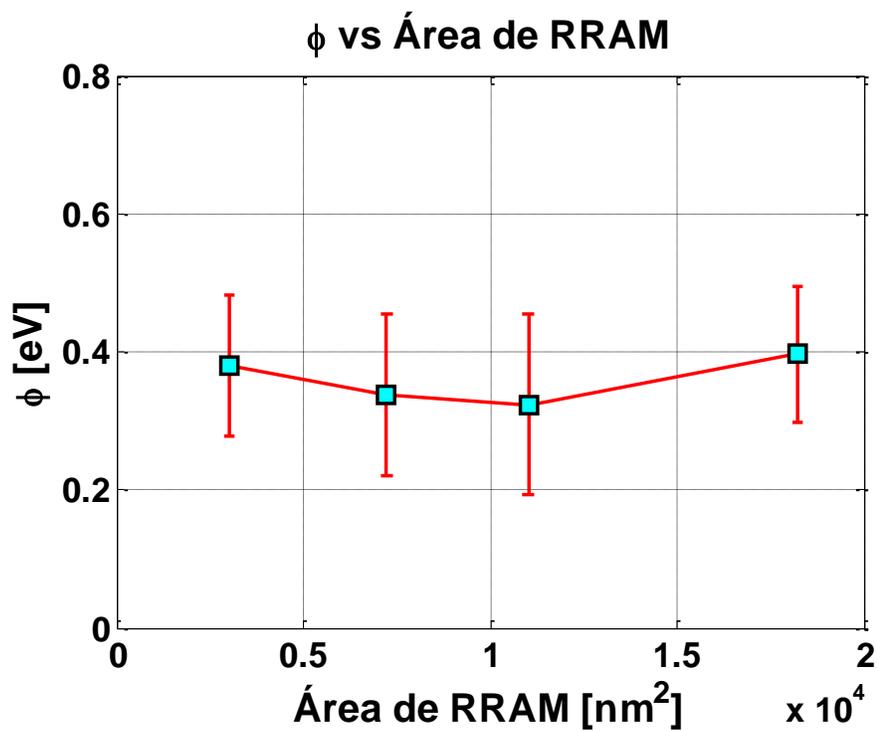


Figura 3.11: Valores del parámetro  $\phi$  con respecto al área de RRAM.

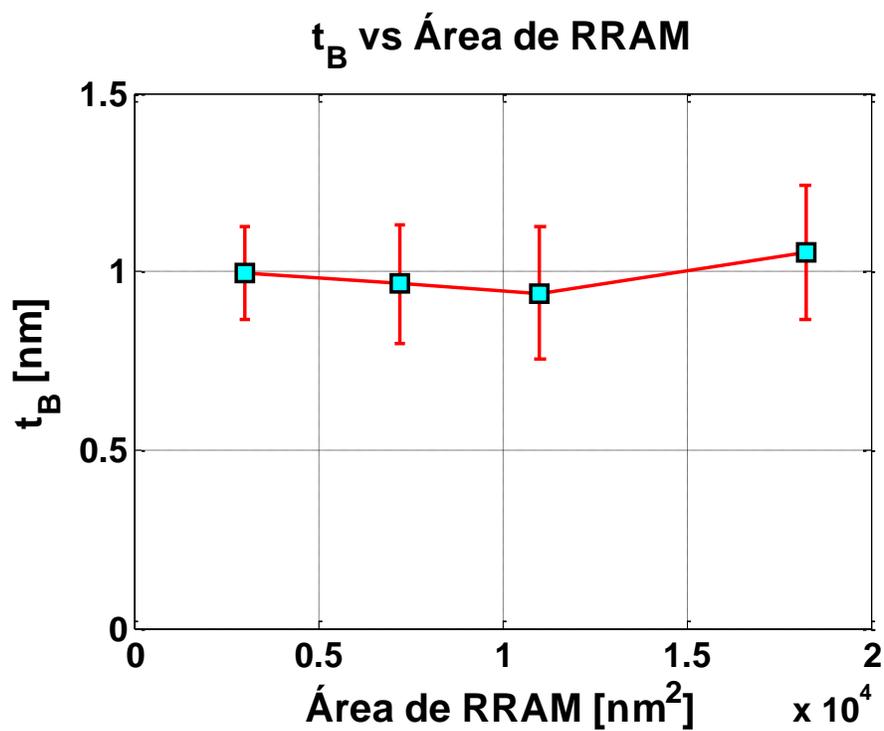


Figura 3.12: Valores del parámetro  $t_B$  con respecto al área de RRAM.

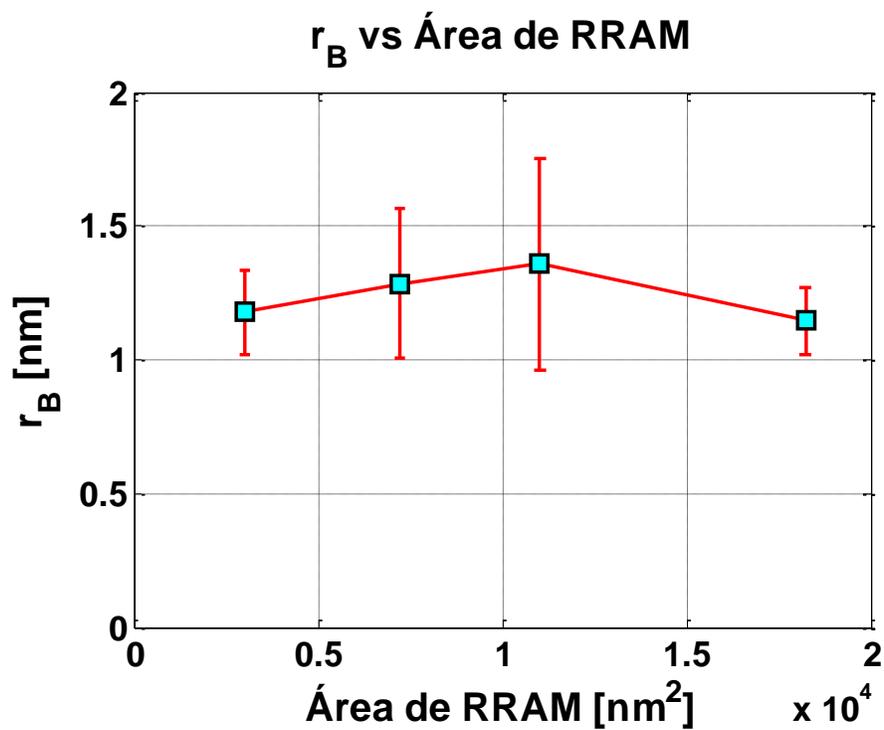


Figura 3.13: Valores del parámetro  $r_B$  con respecto al área de RRAM.

Estos resultados implican que el área de escalamiento de las memorias no afecta la conducción de electrones en HRS. Esto nos lleva a concluir que la conducción está altamente localizada y solo afecta una pequeña porción de la memoria (Waser, 2008). La localización de la conducción coincide con el modelo de filamentos conductivos. Además, la independencia del parámetro  $r_B$  implica que las propiedades dimensionales de los filamentos conductivos también son independientes del área de la RRAM.

Como se explicó en el capítulo 2, la diferencia entre ambos estados resistivos se atribuye a la modulación del ancho de los filamentos conductivos; es decir, las propiedades dimensionales de los filamentos se mantienen en HRS y LRS. Por esta razón la independencia del área puede ser extendida al estado de baja resistencia.

Ya que la conducción en LRS tiene un carácter lineal, es posible explicar la independencia del área con un modelo eléctrico simple: si consideramos la ecuación de la corriente en LRS, cuando la resistencia externa es despreciable; se obtiene la expresión de corriente para un conductor balístico monomodo (Miranda et al, 2010). Esta ecuación se exhibe en (3.1).

$$I = NG_0V = \frac{N}{R_0}V \quad (3.1)$$

Donde  $G_0=2e^2/h=1/R_0$  es la unidad de conductancia cuántica y  $N$  es el número de canales conductivos activos.

Tomando en cuenta un solo filamento,  $N=1$ , es posible modelarlo como una resistencia de valor  $R_0$ . Por simplicidad y congruencia con el modelo de filamentos conductivos se

considera que esta resistencia tiene una forma cilíndrica; cuyo valor estaría dado por (3.2). Un modelo muy similar ya se utilizó en el trabajo de Ielmini et al (2010), donde se describe un filamento cilíndrico pero no se utiliza el enfoque del modelo QPC.

$$R_0 = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{t_{ox}}{(\pi D^2/4)} \quad (3.2)$$

Donde  $\rho$  es la resistividad,  $l$  la longitud y  $S$  la superficie de sección transversal del filamento.  $D$  es el diámetro de la superficie  $S$  y  $t_{ox}$  el espesor del dieléctrico.

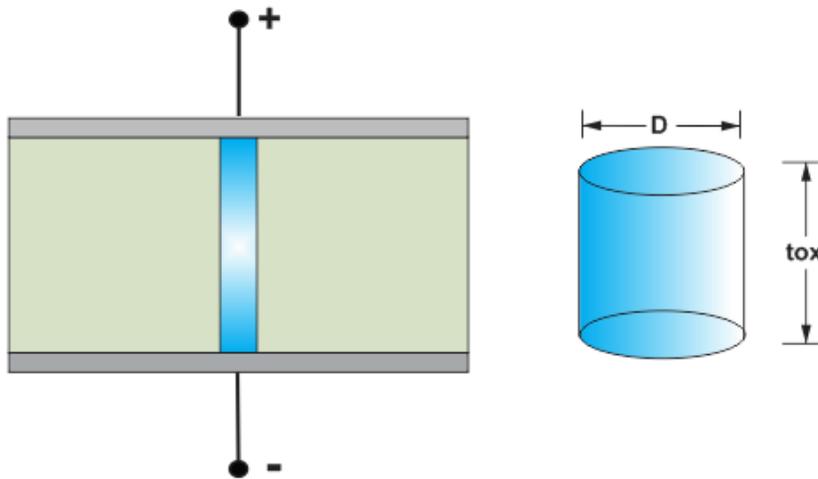


Figura 3.14: Modelo de filamento cilíndrico dentro del dieléctrico de la RRAM.

El esquema de este modelo se expone en la Figura 3.5. De acuerdo los resultados experimentales esta resistencia cilíndrica es independiente del área de la RRAM. Si se observa la ecuación (3.2) para que  $R_0$  sea independiente del área de la RRAM los parámetros  $t_{ox}$  y  $S$  tienen que ser también independientes. En el caso de la superficie  $S$  se puede decir que esta

condición se cumple; puesto que el diámetro de la resistencia  $D$  se relaciona directamente con  $r_B$ , cuya independencia del área ya se comprobó.

Por otro lado, es claro que  $t_{ox}$  no depende del área de la RRAM. Sin embargo; una interrogante nace con respecto a este parámetro, debido a que en trabajos previos se encontró que las características I-V de las memorias son independientes del espesor  $t_{ox}$  (Miranda & Suñé, 2001). El modelo de (3.2) coincide con esta condición sólo si  $t_{ox}$  no afecta las características de  $R_0$ .

Para que esto se cumpla es necesario considerar un filamento con resistividad  $\rho$  variable e inversamente proporcional a  $t_{ox}$ . Si se toma en cuenta un filamento con características de semiconductor y no puramente metálico, como se presume en el modelo QPC, su resistividad está dada por la ecuación (3.3):

$$\rho = \frac{1}{q\mu n} \quad (3.3)$$

Donde  $q$  es la carga del electrón,  $\mu$  es la movilidad y  $n$  es la concentración de portadores de carga. Cualquier cambio en la longitud de  $t_{ox}$  produce un cambio en la concentración de portadores, mientras que se asume que la movilidad se mantiene constante. Esto nos lleva a pensar que la concentración de portadores estaría dada por una expresión de la forma dada en (3.4).

$$n \propto t_{ox} \quad (3.4)$$

De esta forma, cuando  $t_{ox}$  crece la concentración de portadores también crece y la resistividad disminuye. Así, cualquier cambio en  $t_{ox}$  produce cambios en la resistividad, dejando el valor de  $R_0$  siempre constante y haciendo que el modelo en (3.2) concuerde con los resultados de publicaciones anteriores sobre el modelo QPC. Hay que señalar que este análisis sobre  $t_{ox}$  es intuitivo, puesto que no se considera la influencia de la movilidad. Para profundizar en este hecho sería necesario conocer la verdadera naturaleza de los filamentos conductivos, tópico que aún es poco claro para la comunidad científica.

Como conclusión de todo este análisis se puede decir que en una RRAM se producen filamentos conductivos independientes de su área y con características dimensionales muy similares. Adicionalmente, debe notarse que estos resultados son válidos cuando las dimensiones de los filamentos son muy pequeñas en comparación con el área total de la memoria. En nuestro caso, esta condición se cumple puesto que los filamentos conductivos tienen dimensiones en el orden de los pocos nanómetros (de acuerdo a los valores obtenidos para el radio de la constricción  $r_B$ ).

Finalmente, debido a que las dimensiones de las RRAM no tienen efectos sobre su conducción, varias interrogantes nacen con respecto a su potencial de escalamiento y miniaturización. En primer lugar uno podría preguntarse ¿hasta qué límites dimensionales las RRAM pueden escalarse sin que su conducción se vea afectada? Luego, ¿aquellos límites pueden superar a las actuales memorias Flash? Estas incógnitas crean mucho material de estudio para trabajos futuros sobre las memorias resistivas.

### **3.2 Resultados de la dependencia del mecanismo de conducción con las dimensiones del transistor de control.**

Como se mencionó anteriormente, la estructura de una celda RRAM está compuesta por la memoria en sí y un transistor conectado en serie, encargado de controlar el flujo de corriente hacia la misma. Este transistor juega un papel extremadamente importante en la operación de una memoria resistiva, por lo tanto la comprensión de su influencia sobre el mecanismo de conducción de las RRAM es esencial.

Para analizar la posible influencia que puedan tener las dimensiones del transistor de control sobre el mecanismo de conducción de las RRAM, se comparan los valores de los parámetros QPC para distintas longitudes de canal de transistor. La variable de análisis es la longitud de canal  $L$  debido a que tiene una mayor influencia sobre la corriente que el espesor  $W$  (ver Figura 2.7).

Los resultados se muestran en las figuras 3.6 a 3.9; donde los parámetros QPC se grafican con respecto a las tres distintas longitudes de transistor analizadas. En cada figura se presentan los resultados para las tres áreas de RRAM estudiadas; nuevamente se muestran los valores de la media de 150 datos junto con las desviaciones estándar como barras de error.

De la Figura 3.6 puede notarse que los valores del parámetro  $\alpha$  exhiben variaciones mínimas con respecto a las distintas longitudes  $L$ . La misma conclusión se extrae para los parámetros  $\Phi$ ,  $t_B$  y  $r_B$ . Esto sugiere que el cambio de dimensiones del transistor de control no tiene mayores efectos sobre la conducción dentro de las memorias.

Sin embargo, debe notarse que estos resultados fueron inducidos. Es decir, se canceló la influencia del transistor intencionalmente. Esto se logró modificando las condiciones de polarización para cada transistor distinto, de esta forma se obtuvo una aparente estabilidad en los valores de los parámetros QPC.

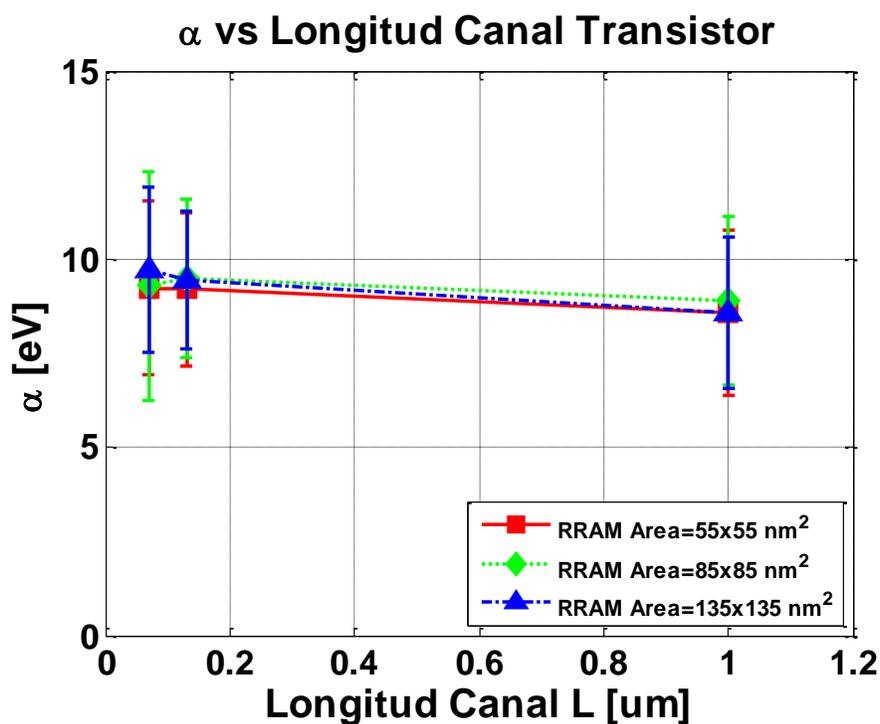


Figura 3.15: Valores del parámetro  $\alpha$  con respecto a la longitud de canal del transistor de control para tres áreas de RRAM.

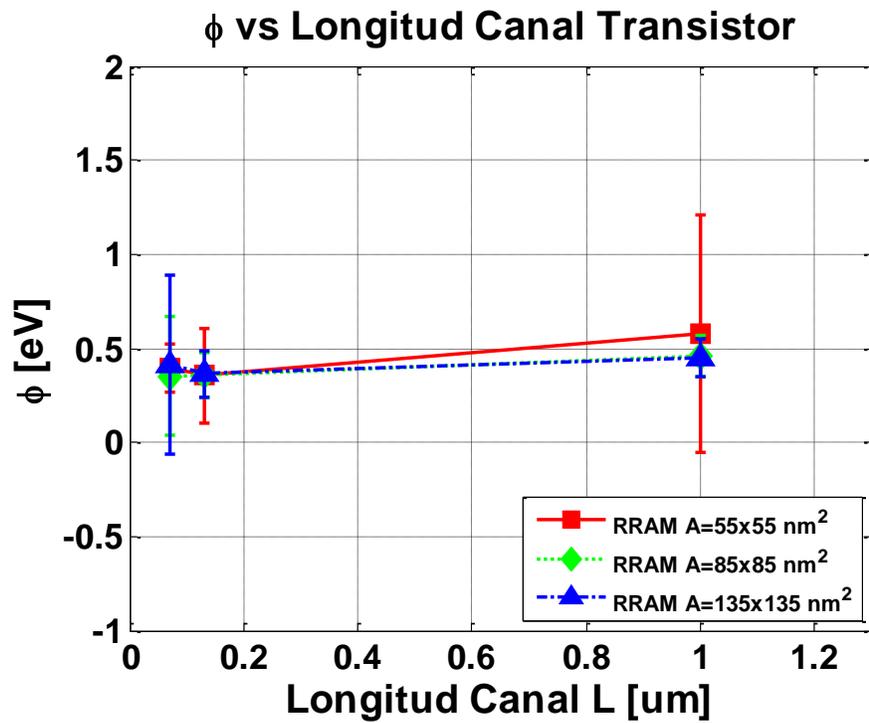


Figura 3.16:  $\Phi$  vs. longitud de canal de transistor de control.

Este hecho puede entenderse de mejor manera observando el esquema de circuito de una celda RRAM (Figura 2.2), junto con la ecuación de corriente entre drenaje y fuente para un transistor MOSFET presentada en (3.5) (Tsividis & McAndrew, 2011).

$$I_{DS} = \frac{W}{L} \mu C_{OX} \left[ (V_G - V_T) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right] \quad (3.5)$$

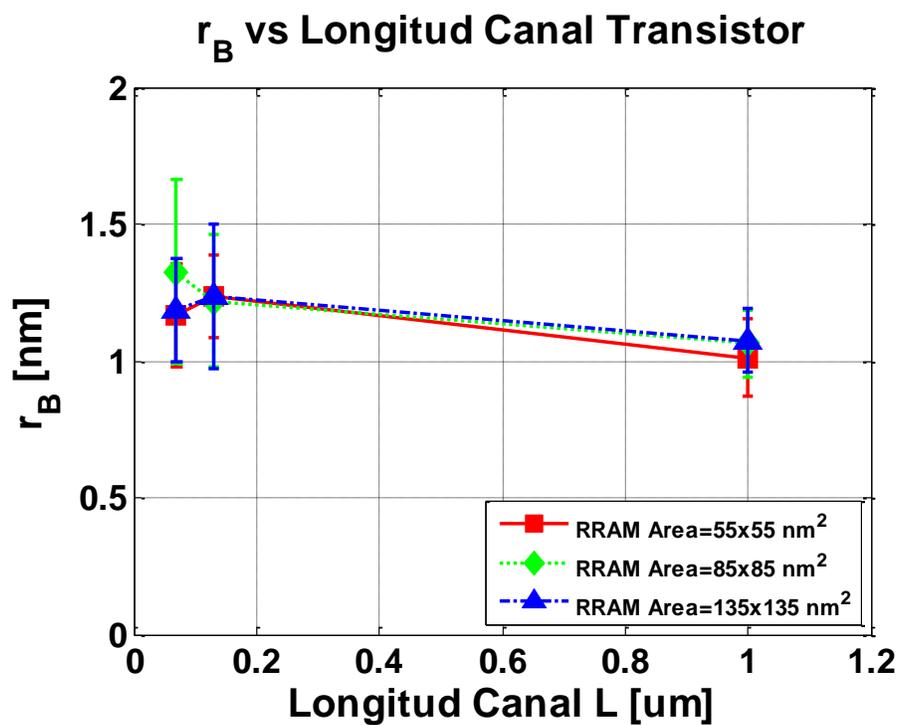


Figura 3.17:  $r_B$  vs. Longitud de canal de transistor de control.

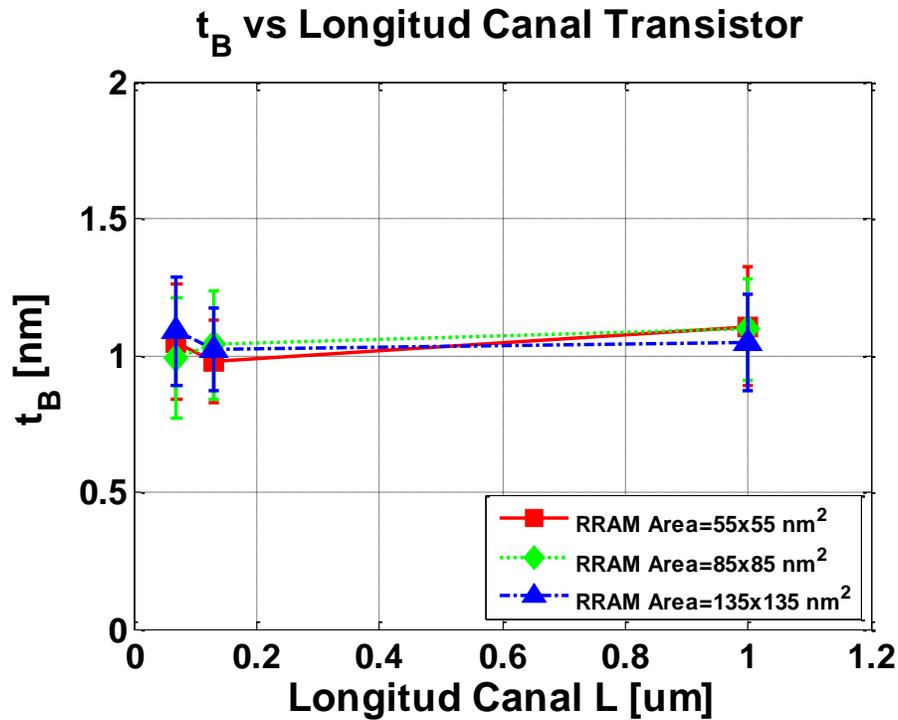


Figura 3.18:  $t_B$  vs. Longitud de canal de transistor de control.

El transistor está encargado de controlar los niveles de corriente que fluyen hacia la memoria, que se modulan de acuerdo a los valores de la polarización de compuerta  $V_G$ . Cuando la longitud del canal del transistor disminuye existen dos efectos importantes: la corriente  $I_{DS}$  aumenta y los valores del voltaje umbral  $V_T$  comienzan a variar (Tsvividis & McAndrew, 2011). Por lo tanto, si la misma polarización de compuerta se usa para transistores con distinta longitud  $L$  la corriente cambiaría y esto sería de gran impacto para la estabilidad de la conducción en una RRAM.

Con un distinto flujo de corriente los valores de los parámetros QPC comenzarían a variar y la operación de la RRAM se modificaría. Es así que en nuestros experimentos los cambios en  $I_{DS}$  y  $V_T$  fueron compensados cambiando los valores de la polarización en la compuerta cuando los valores de  $L$  cambian. Esto se ilustra en la Figura 3.9, donde se grafican los valores de  $V_G$  con respecto a  $L$ . Puede notarse que cuando la longitud de canal aumenta son necesarios valores mayores de voltaje  $V_G$ ; el resultado fue la obtención de valores similares de corriente para las tres distintas dimensiones de canal analizadas.

En conclusión, la influencia del transistor de control en la operación de las RRAM puede ser suprimida mediante la modulación de la polarización en la compuerta. Este hecho puede crear problemas con respecto al consumo de potencia y a la programación de las celdas. Ya que se necesitan distintos voltajes para conseguir las mismas condiciones de corriente, es probable que el potencial de escalamiento de las memorias sea limitado por cuestiones de consumo de energía.

Adicionalmente, debe señalarse que las figuras 3.6 a 3.9 confirman que los parámetros QPC son independientes del área de las memorias. En estos gráficos se observa que los

valores de todos los parámetros QPC tienen valores muy similares para las tres áreas de memoria estudiadas. Es importante mencionar que este estudio se llevó a cabo hasta una longitud de canal de 70nm ( $L_{\text{eff}} = 70-30 = 40\text{nm}$  efectivos) sin tener problemas de estabilidad (Trojman, 2008).

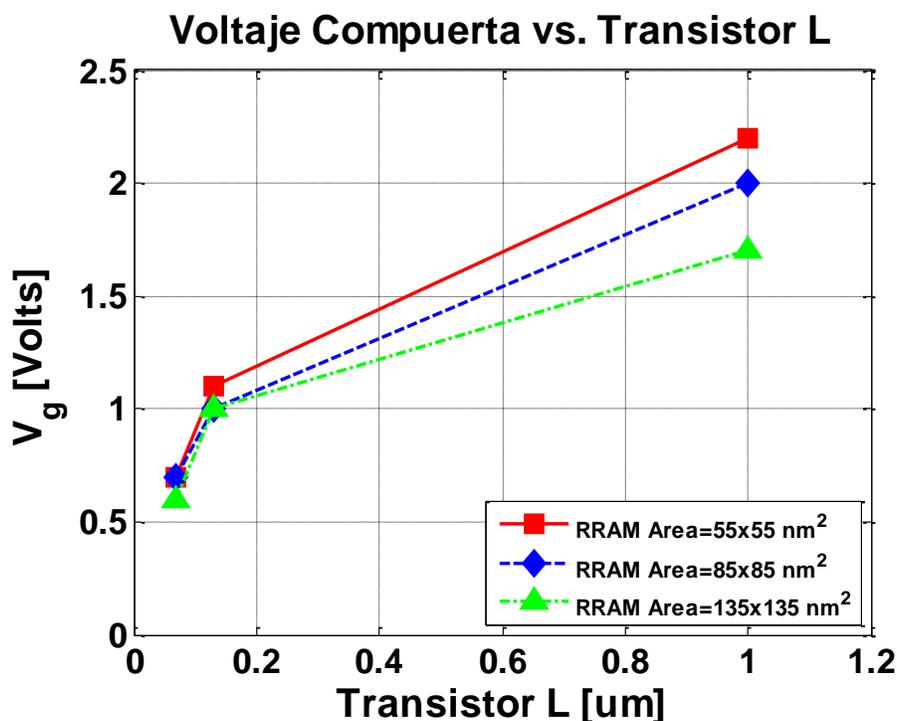


Figura 3.19: Polarización de compuerta en función de la longitud de canal de transistor de control.

### 3.3 Resultados de voltaje de formación con respecto al área de las RRAM.

Para estudiar la influencia del área de las RRAM sobre el voltaje de formación se comparan sus valores con respecto a cuatro áreas distintas de memoria. Los dispositivos utilizados son los que se detallan en la Tabla 2.1. Los resultados se muestran en la Figura 3.11.

De este gráfico se puede distinguir que el voltaje de formación disminuye cuando el área de la memoria aumenta. Es decir, el voltaje de formación es inversamente proporcional al área de RRAM

Estos resultados pueden ser explicados señalando la naturaleza estocástica del proceso de ruptura en el dieléctrico, es decir la formación de trayectorias conductoras. Se ha encontrado que los eventos de ruptura del dieléctrico y el lugar donde la ruptura se produce son aleatorios con respecto a los valores de voltaje y corriente (Maccaronio et al, 2013). Es decir, los filamentos conductivos se ubican en posiciones aleatorias dentro de la RRAM.

En este sentido el área de la RRAM representaría el espacio muestral para los eventos de ruptura; por esta razón una celda con mayor área ofrece mayor probabilidad para que la ruptura se produzca. La consecuencia es que se necesitan mayores voltajes para producir filamentos conductivos cuando el área de la RRAM es pequeña.

Este hecho introduce una cuestión importante sobre el consumo de potencia y el escalamiento de las RRAM. Debido a que las memorias con menores dimensiones necesitan mayores voltajes de formación, el potencial de escalamiento de las RRAM estaría limitado por el consumo de energía. Es decir, debe existir algún límite en que la miniaturización de las RRAM se comprometa por el consumo de potencia.

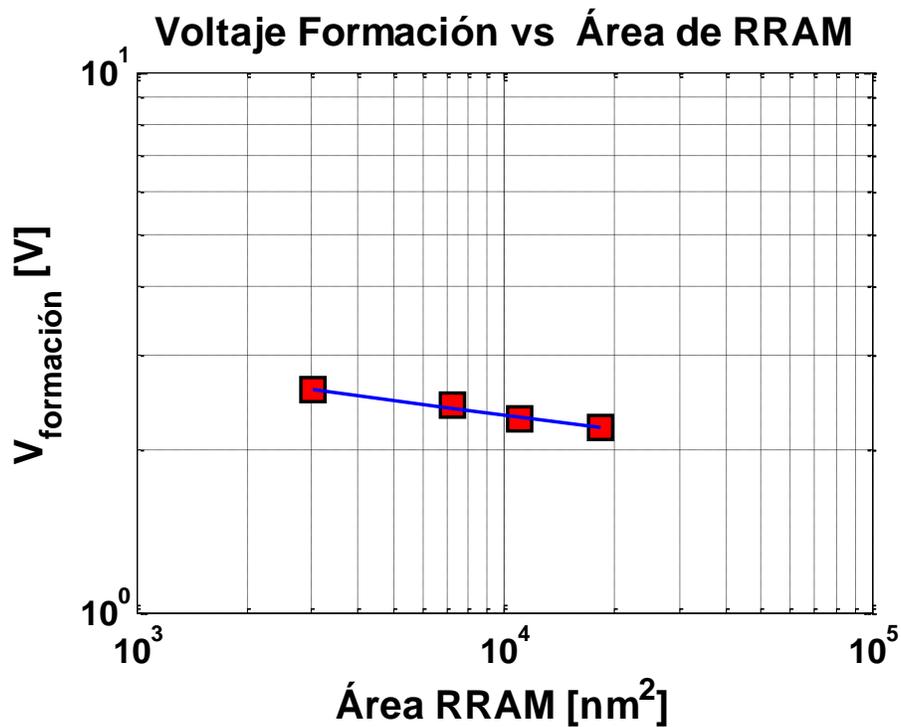


Figura 3.20: Voltaje de formación con respecto al área de las RRAM.

### 3.4 Voltaje de formación con respecto a las dimensiones del transistor de control.

Para encontrar los efectos de las dimensiones del transistor sobre el proceso de formación, se comparan los voltajes de formación entre distintas longitudes de canal de transistor. Se recuerda que las celdas utilizadas son las que se listan en la Tabla 2.2. Los resultados se muestran en la Figura 3.12, donde se grafican los voltajes de formación con respecto a tres longitudes de canal.

De esta gráfica puede concluirse que el escalamiento del transistor de control no tiene mayores efectos sobre el voltaje de formación, pues se obtienen valores similares para las tres

longitudes de canal analizadas. La razón es básicamente la misma que se encontró en la sección 3.2: los resultados fueron inducidos, puesto que el voltaje de polarización en la compuerta  $V_G$  se modifica conforme la longitud de canal cambia.

Al modificar el voltaje de compuerta fue posible obtener valores similares de corriente de formación para las tres distintas longitudes de transistor. Con valores de corriente similares se logra cancelar la influencia del escalamiento del transistor. La Figura 3.13 muestra los valores de corriente de formación obtenidos para las distintas polarizaciones de compuerta (distintas longitudes de canal).

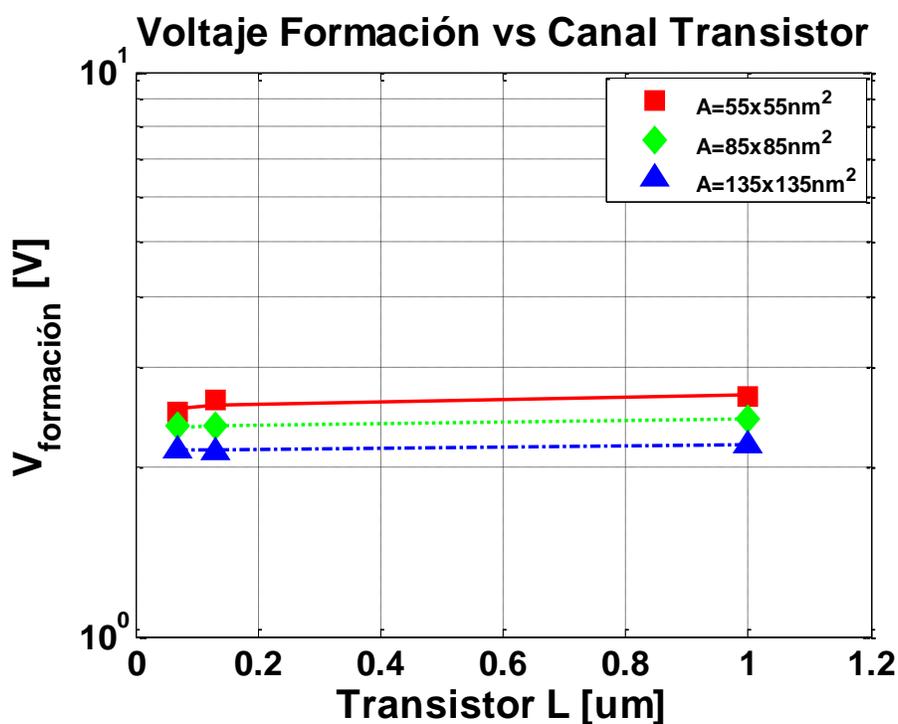


Figura 3.21: Voltaje de formación con respecto a la longitud de canal de transistor.

Se puede observar que la corriente tiene valores muy similares para todos los voltajes  $V_G$ . Sin embargo, puede notarse que en el caso de las longitudes de canal más pequeñas la corriente exhibe valores ligeramente superiores. Esto se atribuye al menor grado de control que se tiene sobre la corriente cuando el canal es pequeño y a los conocidos efectos de canal corto (Tsvividis & McAndrew, 2011). La Figura 3.12 además confirma que las áreas de memoria más pequeñas requieren mayores voltajes de formación.

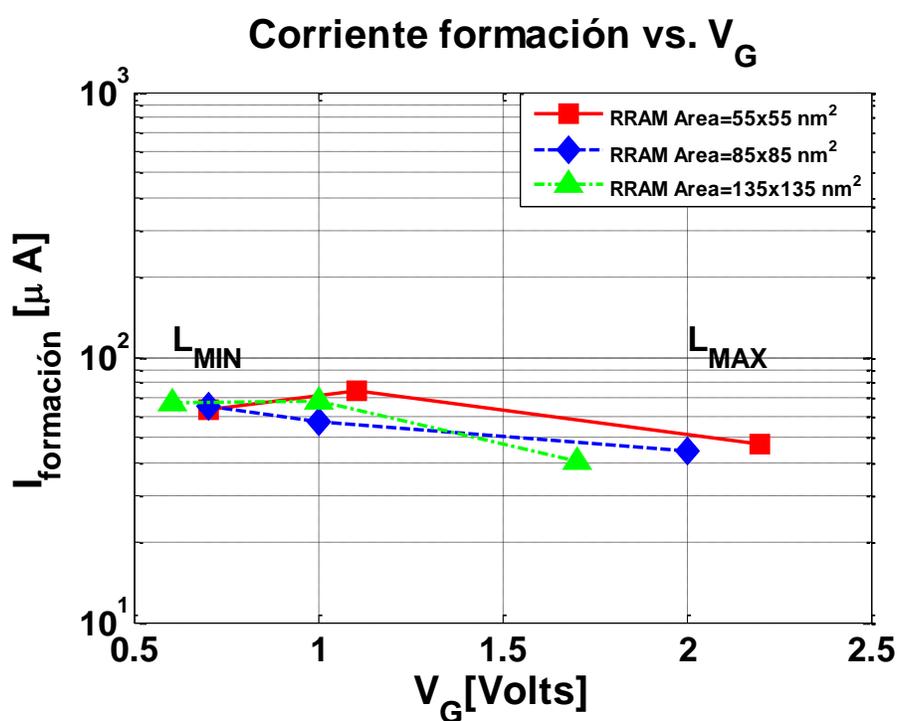


Figura 3.22: Corriente de formación con respecto a voltaje de compuerta  $V_G$ .

## CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES

Luego de analizar los resultados experimentales en detalle es posible sacar varias conclusiones importantes sobre esta investigación. En primer lugar, se encontró que el mecanismo de conducción de las RRAM es independiente de su área. Lo que nos indica que el enfoque que modela filamentos conductivos dentro del dieléctrico es consistente. Desde el punto de vista tecnológico este resultado abre muchas incógnitas sobre el potencial de escalamiento de las RRAM. Deben existir límites en los que la conducción comience a ser afectada por el escalamiento de las memorias y sería muy importante encontrar estos límites.

En segundo lugar, se determinó que la influencia del transistor de control sobre la conducción en las RRAM puede ser cancelada mediante la modulación de su polarización de compuerta  $V_G$ . Mientras se obtengan los mismos valores de corriente, las dimensiones del transistor del control no representan un problema para el funcionamiento de una RRAM. Esto introduce problemas con la programación de las memorias y con el consumo de potencia. Si distintos voltajes deben ser entregados al transistor de control para tener la misma operación, el potencial de escalamiento de las RRAM se vería comprometido por el consumo de energía.

Finalmente, sobre el voltaje de formación se encontró que celdas con menor área requieren mayores valores de voltaje para crear trayectorias conductivas. Por otro lado, la influencia del transistor de control en la formación de filamentos puede ser cancelada aplicando valores apropiados de voltaje en la compuerta. Nuevamente tenemos una importante cuestión sobre el potencial de escalamiento comparado con el consumo de energía de las RRAM. Si se requieren mayores voltajes de formación para celdas más pequeñas, es claro que el escalamiento se contrapone a los voltajes de operación. Todo el análisis nos lleva a concluir

que es de gran importancia encontrar los límites dimensionales en donde el compromiso entre escalamiento y consumo de energía llega a un punto de equilibrio en las RRAM.

## REFERENCIAS

- Avellán, A., et al. (2005). Model for the voltage and temperature dependence of the soft breakdown current in ultrathin gate oxides. *Journal of Applied Physics*, 97, 014104.
- Beck, A., Bednorz, J., Gerber, C., Rossel, C., & Widmer, D. (2000). Reproducible switching effect in thin oxide films for memory applications. *Applied Physics Letters*, 77, 139.
- Degraeve, R., et al. (2010). Generic learning of TDDDB applied to RRAM for improved understanding of. *IEDM Techn*, 10, 632-635.
- Degraeve, R., et al. (2012). Modeling and tuning the filament properties in RRAM metal oxide stacks for optimized stable cycling. *IEDM Techn*.
- Gonon, P., et al. (2010). Resistance switching in HfO<sub>2</sub> metal-insulator-metal devices. *Journal of Applied Physics*, 107, 074507, 1-9.
- Goux, L., et al. (2012). Ultralow sub-500nA operating current high-performance TiN\Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\HfO<sub>2</sub>\Hf\TiN bipolar RRAM achieved through understanding-based stack-engineering. *Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers*, 159-160.
- Govoreanu, B., et al. (2011). 10x10nm<sup>2</sup> Hf/HfO<sub>x</sub> Crossbar Resistive RAM with. *IEEE Electron Device Letters*, 729-732.
- Gyanathan, A., & Yee-Chia, Y. (2011). Multi-level phase change memory devices with Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> layers separated by a thermal insulating Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> barrier layer. *Journal of Applied Physics*, 110, 124517.
- Hickmott, T. (1962). Low-Frequency Negative Resistance in Thin Anodic Oxide Films. *J. Appl. Phys.* 33, 2669.
- Ielmini, D., Nardi, F., & Cagli, C. (2010). Resistance-dependent amplitude of random telegraph-signal noise. *Journal of Applied Physics*, 36, 053053.
- Lee, H., et al. (2008). Electrical evidence of unstable anodic interface in Ru/HfO<sub>x</sub>/TiN unipolar resistive memory. *Journal of Applied Physics*, 92, 142911.
- Lv, Q., et al. (2011). Conducting nanofilaments formed by oxygen vacancy migration in Ti/TiO<sub>2</sub>/TiN/MgO memristive device. *Journal of Applied Physics*, 110, 104511.
- Maccaronio, V., & et al. (2013). DC and low-frequency noise behavior of the conductive filament in bipolar HfO<sub>2</sub>-based resistive random access memory. *Microelectronic Engineering*, 107.
- Miranda, E., & Suñé, J. (2001). Analytic Modeling of Leakage Current Through Multiple Breakdown Paths in. *39th IEEE Int. Rel. Phys. Symp.*, 367-379.

- Miranda, E., Walczyk, C., Wenger, C., & Schroeder, T. (2010). Model for the Resistive Switching Effect in HfO<sub>2</sub>. *IEEE Electron Device Letters*, 31, 609-611.
- Nigo, S. (2012). Conduction band caused by oxygen vacancies in aluminum oxide for resistance random access memory. *Journal of Applied Physics*, 112, 033711.
- Prócel, L., et al. (2013). ). Experimental evidence of the Quantum Point Contact theory in the conduction mechanism of bipolar HfO<sub>2</sub>-based resistive Random Access Memories. *Journal of Applied Physics*, 114.
- Sawa, A. (2008). Resistive switching in transition metal oxides. *Materials Today*, 11, 28-36.
- Sze, S., & Kwok, K. (2007). *Physics of semiconductor devices*. New Jersey: Wiley.
- Trojman, L. (2009). Charge carrier mobility for advanced high-k/metal gate mosfet in cmos technology. *IMEC*.
- Tsividis, Y., & McAndrew, C. (2011). *Operation and Modeling of the MOS transistor*. New York: Oxford University Press.
- Van Houten, H., & Beenakker, C. (1996). Quantum Point Contacts: The quantization of ballistic electron transport through a constriction. *Physics Today*, 22.
- Van Wees, B. (1988). Quantized conductance of point contacts in a two-dimensional electron gas. *Physical Review Letters* 60, 848-850.
- Waser, R., Dittmann, R., Staikov, G., & Szot, K. (2009). Redox-Based Resistive Switching Memories—Nanoionic Mechanisms, Prospects, and Challenges. *Advanced Materials*, 21, 2632–2663.
- Zheng, Y., et al. (2007). BEEM studies on metal high K-dielectric HfO<sub>2</sub> interfaces. *J. Phys. Conf. Ser*, 61, 1347.