

**CONDUCCION ELECTRONICA A TRAVES DE ESTRUCTURAS  
CAPACITIVAS  $\text{SrTiO}_3+\text{Nb}/\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3/\text{Ag}$  CRECIDAS SOBRE SUBSTRATOS  
DE  $\text{SrTiO}_3$  DOPADOS CON Nb**

A. Cortes, E. Delgado, P. Prieto, and W. Lopera

*Thin Film Group, Excellence Center for Novel Materials, Universidad del Valle, A.A. 25360  
Cali, Colombia*

(Recibido 23 de Oct. 2006; Aceptado 2 de Abr. 2007; Publicado 23 de Abr. 2007)

**RESUMEN**

Se llevaron a cabo medidas de corriente voltaje a diferentes temperaturas sobre estructuras capacitivas tipo  $\text{SrTiO}_3+\text{Nb}/\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3/\text{Ag}$  crecidas sobre substratos de  $\text{SrTiO}_3$  dopados con Nb usando la tecnica de sputtering a altas presiones de oxígeno. Las medidas de conductancia revelaron un mecanismo de conducción tipo hopping a través de dos y tres estados localizados en un rango de temperaturas entre 40 K y 130K, mientras que en el rango de temperaturas entre 180 K y 385 K el modelo que mejor de adapta a los resultados es el de hopping por rango variable.

**Palabras claves:** tunelamiento electronico, conductancia, hopping

**ABSTRACT**

Current as function of voltage (I-V curves) measurements at different temperatures were carried out in  $\text{SrTiO}_3+\text{Nb}/\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3/\text{Ag}$  capacitor structures grown on (100)  $\text{SrTiO}_3$  Nb-doped substrates using a high-oxygen pressure on axis sputtering technique. Conductance measurements revealed a hopping mechanism of conduction through 2 or 3 localized states in the range of temperatures between 40 K and 130 K. By the other hand, in the range of temperatures between 180 K and 385 K, our results fit very well with the variable range hopping (VRH) model.

**Key Words:** tunneling, conductance, hopping, PZT

**1. Introducción**

El tunelamiento a través del contacto metal-aislante-metal puede ser descrito como un efecto mecánico cuántico, ya que para barreras aislantes suficientemente delgadas, una corriente puede fluir como el resultado de un solapamiento de las funciones de onda de los electrones en ambos metales. Dentro de este tipo de mecanismos se estudia el tunelamiento elástico e inelástico y las dependencias con respecto a la temperatura y el voltaje.

Para llevar a cabo las medidas de la conductividad en una capa aislante es necesario depositar en forma de películas delgadas, electrodos metálicos en la superficie de una película dieléctrica (aislante) para así facilitar la inyección de elementos de carga del bloque del metal a la capa aislante.

Para el caso en el que se cuenta con una alta densidad de estados localizados, entonces el mecanismo de conducción puede estar representado por un tunelamiento indirecto tipo resonante que se adiciona al tunelamiento directo, en particular para espesores de barrera grandes Glazman y Matveev [1] sugirieron el transporte por hopping inelástico vía dos o más estados localizados formando canales de conducción óptimos para que se realice el proceso de tunelamiento. Por otro lado Mott en su modelo de hopping de rango variable (VRH) [2] dedujo que la longitud típica de un salto, también llamada, la longitud del hopping variable  $l_{VRH}$  puede ser lo suficientemente corta como para que pueda existir un solapamiento finito de las funciones de onda electrónica sobre los estados localizados. Pero, además tiene que ser lo suficientemente grande para encontrar un estado con una energía comparable a la de Fermi. Mott predijo que la longitud de un salto se incrementa con el decrecimiento de la temperatura en un orden  $T^{-1/4}$ . La conductancia, la cual es proporcional a la probabilidad de que suceda tal salto, es dada por:

$$G_{VRH}(T) = \hat{G}_0 \exp \left[ - \left( \frac{T^*}{T} \right)^{1/4} \right]$$

Donde  $T^*$  está relacionado con la densidad  $g$  y el radio  $\alpha^{-1}$  de los estados localizados a través de la siguiente expresión:

$$K_B T^* = 23 / g \alpha^{-3}$$

Para las barreras con espesores inferiores a 2 nanómetros existen estudios que respaldan la probabilidad de que se presente conducción electrónica por medio de tunelamiento electrónico directo. Morán y colaboradores estudiaron el transporte de la corriente para juntas con barreras de SrTiO<sub>3</sub> de espesores de 2 a 20 nm [3]. En esta investigación se observó tunelamiento elástico, pero solamente para espesores de barrera de 2 nm. Para barreras de espesor superior, al proceso de tunelamiento directo se le adiciona el proceso de hopping vía un pequeño número de estados localizados, donde este último domina el comportamiento de transporte.

## 2. Técnicas Experimentales

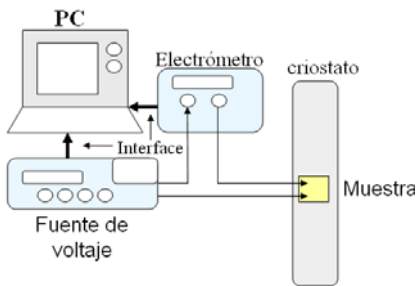
Se crecieron películas delgadas de PZT sobre sustratos monocristalinos de SrTiO<sub>3</sub>+Nb utilizando la técnica de magnetron sputtering, de acuerdo con los siguientes parámetros de crecimiento:

**Tabla 1** Parámetros de crecimiento del material ferroeléctrico PZT sobre SrTiO<sub>3</sub>+Nb

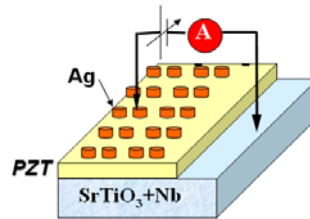
Target	T [°C]	Potencia Suministrada [W]	Bias	Presión de Oxígeno [Mbar]
Pb(Zr <sub>0.52</sub> Ti <sub>0.48</sub> )O <sub>3</sub>	600	50-70	550	1.1×10 <sup>-1</sup> mbar

Sobre las películas de PZT se evaporaron condensadores de Ag, utilizando una máscara de acero inoxidable con perforaciones circulares que corresponden a cada uno de los tamaños que el electrodo superior puede tener. Las áreas de estos electrodos son del orden de: 5.0×10<sup>-4</sup>, 1.3×10<sup>-3</sup>, 3.8×10<sup>-3</sup> y 6.5×10<sup>-3</sup> cm<sup>2</sup>.

Para llevar a cabo las medidas de corriente voltaje (I-V) se implementó un sistema de adquisición de datos (ver Figura 1) compuesto por una fuente de voltaje/corriente programable Keithley 228A, un electrómetro DMM Keithley 196, un crióstato con el que se pueden realizar medidas de 20 a 300 K. Se realizaron medidas I-V para las temperaturas de 180, 250, 310, 350, y 385 K. El condensador utilizado fue debidamente escogido después de realizar una serie de pruebas sobre condensadores de varios tamaños, de forma tal que el condensador contara con propiedades ferroeléctricas. La estructura capacitiva SrTiO<sub>3</sub>+Nb/Pb(Zr<sub>0.52</sub>Ti<sub>0.48</sub>)O<sub>3</sub>/Ag está detallada en la figura 2.



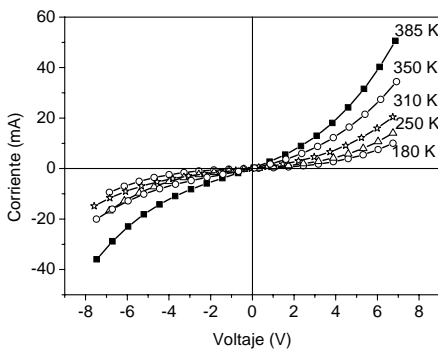
**Figura 1** Esquema del equipo utilizado para desarrollar las medidas I-V.



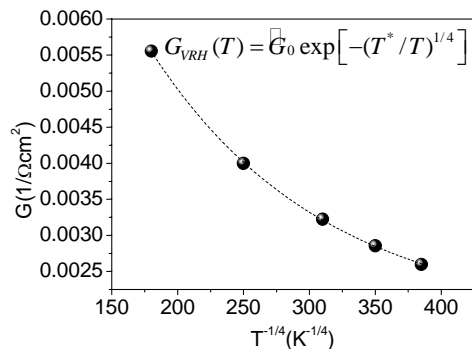
**Figura 2** Esquema de la estructura capacitiva SrTiO<sub>3</sub>+Nb/Pb(Zr<sub>0.52</sub>Ti<sub>0.48</sub>)O<sub>3</sub>/Ag y las conexiones para realizar las medidas de I-V.

### 3. Resultados

Se llevaron a cabo medidas de corriente voltaje sobre las estructuras capacitivas SrTiO<sub>3</sub>+Nb/PZT/Ag en un rango de temperatura entre 180 y 385 K las curvas respectivas se muestran en la figura 3.



**Figura 3** Curvas I-V de una capacitor típico de SrTiO<sub>3</sub> + Nb/PZT/Ag a diferentes temperaturas.



**Figura 4** Ajustes de la curva  $G$  vs.  $T^{-1/4}$  utilizando el modelo de hopping de rango variable (VRH).

Las curvas obtenidas para la estructura SrTiO<sub>3</sub> + Nb/PZT/Ag se caracterizan por tener un comportamiento semiparabólico típico de este tipo de estructuras sin la presencia de discontinuidades.

des, y se disminuye su concavidad cuando la temperatura decrece. La asimetría de las curvas I-V pueden deberse a las diferentes alturas de las barreras de potencial, lo cual corresponde a diferentes funciones de trabajo en las interfases metal-aislante-metal.

Las curvas I-V presentan una asimetría que deben tener su causal en las diferentes funciones de trabajo del electrodo superior (Ag) y el electrodo inferior ( $\text{SrTiO}_3+\text{Nb}$ ) que conforman cada condensador. De la parte óhmica de las curvas características de I-V en el rango de bajos voltajes (conductancia a cero bias) se deduce que la resistencia se incrementa cuando la temperatura disminuye. La resistencia de la capa de PZT varía de  $0.9 \text{ M}\Omega$  a 180 K a  $0.1 \text{ M}\Omega$  a 385 K.

Se utilizó el modelo de Mott (hopping de rango variable) para describir el comportamiento del transporte de carga a través de la capa de PZT el cual ajusta bien para el rango de temperaturas estudiado (ver figura 4) mostrando una fuerte dependencia de la conductancia con la temperatura.

La conductancia está regida a través de pocos canales, según GM, en el rango de bajas temperaturas ( $< 100 \text{ K}$ ), pero en el rango de altas temperaturas ( $> 100 \text{ K}$ ) el proceso de tunelamiento es regido por el mecanismo de hopping de rango variable (VRH). Lo anterior nos muestra que el proceso de tunelamiento electrónico a través de estructuras capacitivas de PZT, pueden ser interpretados con un tipo de transición entre una conducción regida por un mecanismo hopping via N estados localizados a hopping de rango variable cuando la temperatura es incrementada.

#### 4. Conclusiones

Se fabricaron estructuras tipo capacitivas tipo  $\text{SrTiO}_3+\text{Nb}/\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3/\text{Ag}$  crecidas sobre sustratos de  $\text{SrTiO}_3$  dopados con Nb. Las curvas I-V se caracterizan por tener un comportamiento semiparabólico típico de este tipo de estructuras sin la presencia de discontinuidades, donde se disminuye su concavidad cuando la temperatura decrece. La conductancia se caracterizó por tener un comportamiento de acuerdo al modelo VRH dentro del rango de temperaturas estudiado.

El proceso de tunelamiento electrónico a través de estructuras capacitivas, puede ser interpretado como una transición entre el mecanismo de hopping via N estados localizados a hopping de rango variable cuando la temperatura es incrementada.

#### 5. Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por COLCIENCIAS a través del proyecto de investigación No. 1106-05-11458, al Centro de Excelencia en Nuevos Materiales (CENM) con contrato No. 0043-2005 y la Universidad del Valle a través del proyecto No. 7681.

#### 6. Referencias

- [1] L. I. Glazman y K. A. Matveev, Sov. Phys. JETP 67, 1276 (1988).
- [2] N. F. Mott y E.A. Davis, Electronic Processes in non-crystalline materials, 2<sup>nd</sup> ed (Oxford university press, New Cork, 1979).
- [3] O. Morán, R. Hott, R. Schneider, J. Halbritter; J. Appl. Phys. 94, 6717 (2003)