

Fecha de presentación del Informe:

Día 12

Mes

07

Año

2019

1. Datos generales del Proyecto

Código del proyecto: 71109			
Título del proyecto: Estudio del efecto de conmutación resistiva en heteroestructuras basadas en óxidos multifuncionales.			
Facultad o Instituto Académico: Facultad de Ciencias Naturales y Exactas			
Departamento o Escuela: Departamento de Física			
Grupo (s) de investigación: Películas Delgadas, Física Teórica del Estado Sólido.			
Entidades: Universidad del Valle, colaboración Universidad de los Andes			
Palabras claves: Conmutación resistiva, películas delgadas, memorias resistivas, manganitas, perovskitas, óxidos, difracción de rayos x y computación neuromórfica.			
Investigadores ¹	Nombre	Tiempo asignado	Tiempo dedicado
Investigador Principal	Katherine Gross	5	5
Coinvestigadores	María Elena Gómez De Prieto	10	10
	Wilson Lopera Muñoz	5	5
	Nelson Porras Montenegro	5	5
	Luisa Fernanda Suarez	10	10
	John Betancourt	10	10
	Mario Fernando Quiñonez	10	10
	Margoth Lorena Torres	20	20
	Santiago Ceballos	20	20
	Lorena Marín	40	40
Otros participantes	Juan Gabriel Ramírez, Universidad de los Andes	2	2

¹ Todas las personas relacionadas en el informe y que participen en el proyecto deben haber suscrito el acta de propiedad intelectual de acuerdo con los formatos establecidos.

2. Resumen ejecutivo:

La conmutación resistiva de estructuras tipo conductor/aislante/conductor es actualmente un tópico altamente investigado debido a su potencial aplicación en el campo de dispositivos de memoria no volátil. El propósito general de este proyecto consistió en estudiar los mecanismos de conducción en el efecto de conmutación resistiva (RS) en películas y heteroestructuras basadas en óxidos multifuncionales y su dependencia con parámetros de fabricación y propiedades físicas de los materiales involucrados. Específicamente se fabricaron películas delgadas de óxidos multifuncionales tales como $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$, BiFeO_3 , HfO_2 , CeO_2 , $\text{ZnO}(\text{Co}, \text{Mn})$, YMnO_3 , CuO_2 , entre otros, las cuales fueron caracterizadas en sus propiedades físicas, estructurales, morfológicas y de transporte eléctrico. Una vez los sistemas estuvieron caracterizados a modo de monocapas, se fabricaron estructuras capacitivas tipo conductor/aislante/conductor utilizando los diferentes materiales óxidos en combinaciones tales como $\text{HfO}_2/\text{Pt}/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$, $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, $\text{BiFeO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, $(\text{Mn}, \text{Co})\text{ZnO}/\text{YMnO}_3$, entre otros. Sobre estos sistemas se realizaron mediciones de magnitudes físicas que permitieron caracterizar el fenómeno de conmutación resistiva (Curvas I-V, capacitancia, $r(R)=R_{\text{HRS}}/R_{\text{LRS}}$, tiempos de retención, entre otros) y su dependencia con parámetros de deposición y material de los electrodos con el fin de dilucidar sobre los mecanismos de conducción. Se identificó que el espesor del óxido aislante juega un papel importante en la conmutación eléctrica del dispositivo; tal es el caso del sistema $\text{HfO}_2/\text{Pt}/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$. Este sistema se caracterizó usando indio (In) como electrodo superior variando el espesor de la capa HfO_2 en un rango de 20 a 155 nm. Al variar el espesor, el dispositivo exhibió respuestas de conmutación resistiva diferentes de carácter unipolar, bipolar y complementaria. El dispositivo $\text{In}/\text{HfO}_2(155\text{nm})/\text{Pt}$ exhibió un tiempo de retención superior a 1.8×10^5 s, valor con el cual se extrapola la retención de los estados de resistencia a un orden de 10 años. Por otro lado, se estudió la respuesta de conmutación resistiva en función del material del electrodo superior, usando $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ y Ag en el sistema $\text{BiFeO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$; encontrándose asimetrías en las curvas corriente-voltaje que permiten elucidar el mecanismo de conducción presente en cada caso.

Este proyecto se ha logrado desarrollar en estrecha colaboración con el grupo del profesor Juan Gabriel Ramírez, del Departamento de Física de la Universidad de Los Andes, Bogotá. Contamos con la valiosa colaboración de la Doctora Lorena Marín Mercado, pasante posdoctoral financiada por la Vicerrectoría de Investigaciones. La realización de este proyecto ha permitido obtener productos para la generación y divulgación de nuevo conocimiento y ha sido insumo para fortalecer la formación investigativa de estudiantes de pregrado y posgrado en ciencias e ingeniería. Dentro del marco del proyecto se vincularon estudiantes de maestría y doctorado en Ciencias-Física, pregrado y maestría en Ingeniería. Este proyecto permitió plantear tres propuestas de investigación: una en colaboración con el SENA, otra a la convocatoria de jóvenes investigadores e innovadores y otra en curso para presentarlo ante el Banco de la República en colaboración con universidades externas. Se presentaron 6 trabajos en eventos nacionales e internacionales, se obtuvo 2 publicaciones en revistas de circulación internacional y 1 en curso para ser sometida a publicación; se culminó 1 tesis de

maestría, una de doctorado, están en desarrollo tres tesis de maestría y una de pregrado. Se realizaron 2 pasantías en la Universidad de Los Andes.

Abstract

The resistive switching of conductor / insulator / conductor type structures is currently a highly researched topic due to its potential application in the field of non-volatile memory devices. The general purpose of this project was to study the conduction mechanisms in the effect of resistive switching (RS) in films and heterostructures based on multifunctional oxides and their dependence on manufacturing parameters and physical properties of the materials involved. Specifically, thin films of multifunctional oxides such as $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$, BiFeO_3 , HfO_2 , CeO_2 , $\text{ZnO}(\text{Co}, \text{Mn})$, YMnO_3 , CuO_2 , among others were made, which were characterized in their physical, structural, morphological properties and electric transport. Once the systems were characterized as monolayers, capacitive structures were manufactured type conductor / insulator / conductor using the different oxides materials in combinations such as: $\text{HfO}_2/\text{Pt}/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$, $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, $\text{BiFeO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, $(\text{Mn}, \text{Co})\text{ZnO}/\text{YMnO}_3$, among others. On these systems, physical magnitude measurements were made that allowed to characterize the phenomenon of resistive switching (Curves IV, capacitance, $r(R)=R_{\text{HRS}}/R_{\text{LRS}}$, retention times, among others) and its dependence with parameters of deposition and material of the electrodes in order to elucidate on the driving mechanisms. It was identified that the thickness of the insulating oxide plays an important role in the electrical switching of the device; such is the case of the $\text{HfO}_2/\text{Pt}/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ system. This system was characterized using indium (In) as the upper electrode, varying the thickness of the HfO_2 layer in a range of 20 to 155 nm. By varying the thickness, the device exhibited different resistive switching responses of unipolar, bipolar and complementary character. The In/HfO_2 (155nm)/Pt device exhibited a retention time of more than 1.8×10^5 s, a value by which the retention of resistance states is extrapolated to an order of 10 years. On the other hand, the resistive switching response was studied as a function of the upper electrode material, using $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ and Ag in the $\text{BiFeO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ system; finding asymmetries in the current-voltage curves that allow to elucidate the driving mechanism present in each case.

This project has been developed in close collaboration with the group of Professor Juan Gabriel Ramírez, from the Physics Department of the University of Los Andes, Bogotá. We have the valuable collaboration of Dr. Lorena Marín Mercado, postdoctoral intern financed by the Vicerectoria of Research. The realization of this project has allowed obtaining products for the generation and dissemination of new knowledge and has been an input to strengthen the research training of undergraduate and graduate students in science and engineering. Within the framework of the project, students of master's and doctorate in Sciences-Physics, undergraduate and master's degree in Engineering were linked. This project allowed us to propose three research proposals: one in collaboration with the SENA, another to the call for young researchers and innovators and another in progress to present it to the Banco de la República in collaboration with external universities. Six papers were presented at national and international events, 2 publications were published in journals of international circulation and 1 in progress to be submitted for publication; 1 master's thesis, one doctorate, three master's and one undergraduate thesis are under development. Two internships were carried out at the University of Los Andes.

3. Síntesis del proyecto:

Tema:

Estudiar el efecto de conmutación resistiva que se presenta en algunos materiales óxidos aislantes y semiconductores en forma de películas delgadas en estructura capacitiva tipo conductor/aislante/conductor o heteroestructuras basadas en óxidos diferentes.

Objetivos:

General

Estudiar los mecanismos de conducción en el efecto de conmutación resistiva (RS) en películas y heteroestructuras basadas en óxidos multifuncionales y su dependencia con parámetros de fabricación y propiedades físicas de los materiales involucrados.

Específicos

1. Obtener en estructura capacitiva películas delgadas de alta calidad de materiales óxidos que exhiban efecto de conmutación resistiva: variar sistemáticamente el óxido aislante y el material del electrodo desde metales hasta óxidos conductores.
2. Caracterizar las películas crecidas en sus propiedades físicas (constante dieléctrica, ferroelectricidad, magnetización, polarización eléctrica, según el caso), estructurales (cristalina y morfología) y de transporte.
3. Obtener en forma capacitiva heteroestructuras (bicapas) de alta calidad de dos materiales óxidos con propiedades físicas diferentes pero compatibles: variar sistemáticamente la combinación de óxidos y los electrodos metálicos.
4. Caracterizar las bicapas crecidas en sus propiedades físicas (constante dieléctrica, ferroelectricidad, magnetización, polarización eléctrica, según el caso), estructurales (cristalina y morfología) y de transporte.
5. Diseñar sistema de adquisición automática de datos para la medición de la propiedad de conmutación resistiva.
6. Identificación y modelado de los mecanismos físicos presentes.
7. Correlación de propiedades estructurales, eléctricas, magnéticas, y de polarización con el efecto RS para explicar los resultados basados en posibles mecanismos de conmutación resistiva.
8. Divulgar resultados de investigación, someter a publicación los resultados obtenidos y hacer un reporte final de los logros alcanzados.

Metodología

Fabricación de muestras

En primera instancia se fabricaron películas delgadas de óxidos multifuncionales tales como $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$, BiFeO_3 , BaTiO_3 , HfO_2 , CeO_2 , $\text{ZnO}(\text{Co}, \text{Mn})$, YMnO_3 , CuO_2 , entre otros,

sobre sustratos conductores de tipo Pt/TiO₂/SiO_x/Si, STO dopado con Nb y sobre sustratos aislantes (STO, LAO). Posteriormente se fabricaron estructuras capacitivas tipo conductor/aislante/conductor utilizando los diferentes materiales óxidos en combinaciones tales como: HfO₂/Pt/TiO₂/SiO₂/Si, La_{1-x}Ca_xMnO₃/YBa₂Cu₃O_{7-δ}, BiFeO₃/YBa₂Cu₃O_{7-δ}, (Mn, Co)ZnO/YMnO₃, entre otros. Esto se realizó en el laboratorio de Películas Delgadas de la Universidad del Valle, pero también en colaboración con el grupo de la profesora Heidemarie Smith en la Universidad de Chemnitz, del profesor Juan Nino en la Universidad de Florida en Gainesville y el profesor Gabriel Ramírez en la Universidad de los Andes.

Caracterización estructural y morfológica

La caracterización estructural de las muestras se llevó a cabo utilizando la técnica de difracción de rayos x en las configuraciones Bragg-Brentano, haz rasante y reflectividad, disponible en la Facultad de Ciencias Naturales y Exactas de la Universidad del Valle. La caracterización morfológica, mediante análisis estadístico de la morfología superficial, se realizó por medio de microscopía de fuerza atómica (AFM) disponible en la Universidad del Valle.

Caracterización dieléctrica

La caracterización dieléctrica y la caracterización de las interfaces electrodo/aislante se realizó por medio de mediciones de impedancia a diferentes temperaturas ($T = 25, 33, 51$ y $70\text{ }^{\circ}\text{C}$). Estas medidas se realizaron en el laboratorio del profesor Nino, NRG, en la Universidad de Florida en Gainesville. Las curvas de impedancia se analizaron por medio del software disponible en UF.

Caracterización magnética

El comportamiento de la magnetización en función de la temperatura y mediciones de ciclos de histéresis de las películas delgadas de La_{1-x}Ca_xMnO₃, se obtuvo mediante la técnica de magnetometría de muestra vibrante (VSM) y fenómenos de transporte eléctrico haciendo uso del equipo Physical Property Measurement System (PPMS) del Centro de Excelencia de Nuevos Materiales (CENM).

Medición del efecto de conmutación resistiva RS (resistive switching)

Se realizó el diseño y puesta en marcha de un protocolo de medida y toma automática de datos, en estrecha colaboración con el profesor Jairo Roa y su estudiante Jorge Cardona de la Universidad Nacional de Colombia en Bogotá, utilizando una fuente de poder Keithley 2450 SourceMeter para automatizar medidas de corriente como función del voltaje para la identificación del efecto de conmutación resistiva (CR) y obtener la resistencia del dispositivo en los estados de alta resistencia (HRS, (de sus siglas en inglés High Resistance State) y baja resistencia (LRS, de sus siglas en inglés Low Resistance State); y demás parámetros que caracterizan el fenómeno CR: número de ciclos que el dispositivo puede mantener los dos estados de resistividad distinguibles uno del otro (llamado endurance); tiempo de retención del dispositivo, es decir tiempo en el cual el sistema mantiene uno de los dos estados sin pérdida de información; etc.

Estudio del mecanismo de RS en muestras de óxidos multifuncionales

El estudio de los mecanismos de RS se realizó mediante el ajuste de las curvas corriente-voltaje obtenidas experimentalmente. Los ajustes realizados permitieron identificar diferentes tipos de mecanismos en las muestras: conducción óhmica, conducción limitada por carga espaciada, conducción Frenkel, entre otras.

Correlación de resultados y planteamiento de un modelo

Con base en los resultados obtenidos mediante los ajustes a las curvas corriente-voltaje, impedancia, y basándonos en la fundamentación teórica de los fenómenos de transporte en sólidos dieléctricos, en los efectos que aparecen en la estructura electrónica en toda interfaz metal/aislante o metal/semiconductor o semiconductor/aislante, se pudo inferir en los posibles mecanismos de transporte eléctrico presente y el efecto del espesor y de las condiciones de depósito sobre estos.

Revisión Bibliográfica, Divulgación, Publicación y reportes

Los resultados obtenidos fueron analizados y discutidos en seminarios de investigación; también fueron divulgados a la comunidad a través de coloquios, seis participaciones en eventos científicos nacionales e internacionales; se escribieron reportes, se publicaron artículos (2) en revistas de circulación internacional y 1 en curso para ser sometida a publicación. Se plantearon tres propuestas de investigación: una en colaboración con el SENA, otra a la convocatoria de jóvenes investigadores e innovadores y otra en curso para presentarlo ante el Banco de la República en colaboración con universidades externase.

Resultados obtenidos:

Correspondiente con los objetivos 1 - 2: (HfO₂ y CeO₂:Nd)

El dióxido de hafnio HfO₂ es un material con una alta constante dieléctrica $\epsilon \sim 25$ y un band gap cerca de 5.0 eV, ha presentado el efecto de conmutación resistiva por lo cual se fabricaron dispositivos tipo capacitor utilizando el HfO₂ como dieléctrico. Se crecieron películas delgadas de HfO₂ variando el espesor (entre 23 nm y 155 nm), sobre sustratos de Pt/TiO₂/SiO₂/Si utilizando la técnica de pulverización catódica asistida por magnetrón RF. Las muestras fueron caracterizadas por medio de difracción de rayos-X y AFM. Para el estudio del efecto de conmutación resistiva se depositaron electrodos metálicos de indio (In) sobre la capa de HfO₂, obteniéndose heteroestructuras tipo capacitor In/HfO₂/Pt. Utilizando una fuente de poder Keithley 2450 SourceMeter se realizaron las medidas de corriente como función del voltaje, identificando que todos los dispositivos presentan el efecto de conmutación resistiva. En la Figura 1 se observa el comportamiento de la razón $r(R)=R_{HRS}/R_{LRS}$ respecto al espesor de HfO₂. Se observa que dicho valor aumenta para espesores mayores a 100 nm, presentando un valor de 1.33 ± 0.09 para el dispositivo con espesor de 155 nm de HfO₂.

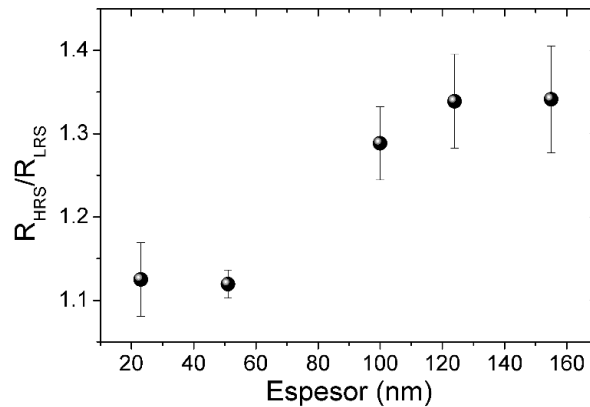


Figura 1: Razón entre los valores de resistencia de cada estado como función del espesor de la capa de HfO_2 .

En el dispositivo $\text{In}/\text{HfO}_2/\text{Pt}$ con un espesor $t_{\text{HfO}_2}=155$ nm se midió la cantidad de ciclos que el dispositivo puede mantener los dos estados de resistividad distinguibles uno del otro (llamado endurance), obteniendo un valor de mayor a 500 ciclos, mientras que el tiempo de retención del dispositivo, es decir tiempo en el cual el sistema mantiene uno de los dos estados sin pérdida de información indica valores superiores a 1.8×10^5 s, Figura 2, valor con el cual se puede extrapolar la retención de los estados a 10 años.

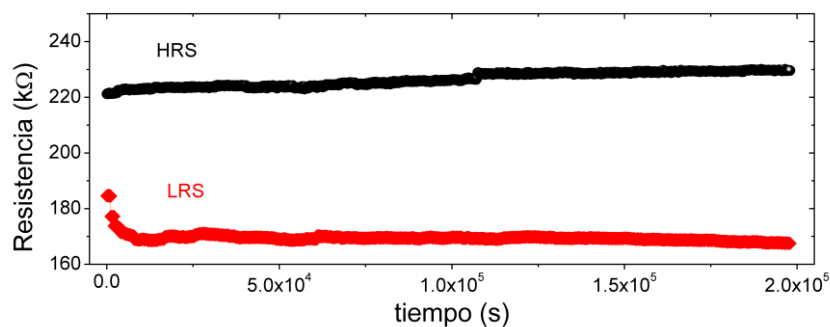


Figura 2: Medición del tiempo de retención en la muestra $\text{In}/\text{HfO}_2/\text{Pt}$ con espesor $t_{\text{HfO}_2}=155$ nm.

Los detalles de estos resultados se encuentran en el Anexo 1-A. Esta investigación culminó con una tesis de maestría en ciencias físicas cuyos documentos de soporte se relacionan más adelante.

Se estudió la influencia del dopaje de Nd en películas delgadas de CeO_2 (NDC), en las propiedades estructurales, morfológicas y eléctricas, buscando con ello optimizar parámetros para el desarrollo de dispositivos de almacenamiento. Las muestras fueron analizadas mediante las técnicas SEM, HR-TEM, XPS y AFM. Las propiedades eléctricas fueron estudiadas mediante espectroscopia de impedancia, las cuales indican que las muestras exhiben una conductividad iónica, símbolo azul en la gráfica. Los gráficos de Nyquist de impedancia compleja exhiben un arco semicircular a altas

frecuencias características de la conducción a través de los granos. A través del análisis de los datos, el software ZView®, el mejor ajuste (símbolo rojo) corresponde a un circuito equivalente, insertado en la Figura 3, de resistencias R y elemento de fase constante (CPE). R_g y CPE_g representan la contribución del grano, y R_{gb} y CPE_{gb} representan la contribución del límite del grano. Hemos calculado la conductividad para muestras con diferentes espesores y en diferentes medidas de temperatura. Los valores de conductividad oscilan entre $0,08$ y $0,5 \cdot 10^{-8}$ (S/cm) a temperatura ambiente para la muestra más delgada (47 nm) y la más gruesa (325 nm), y entre $49,8$ y $103,0 \cdot 10^{-8}$ (S/cm) para las mismas muestras a 70°C .

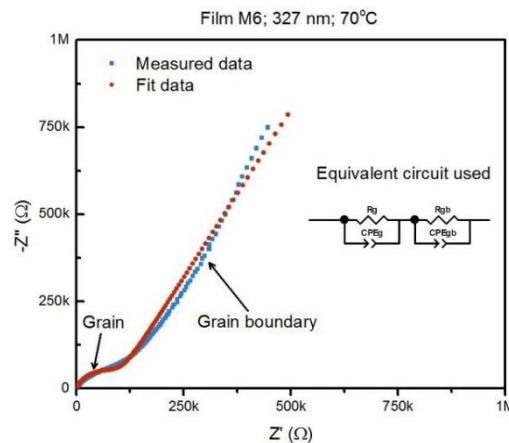


Figura 3: Diagrama representativo de Nyquist para películas policristalinas de NDC. Inserción: Circuito equivalente para estructura capacitiva Pt/NDC/Pt.

La Figura 4 muestra la dependencia Arrhenius de la conductividad con la temperatura, de las cuales podemos extraer la energía de activación, que es la energía necesaria para que un ion o un electrón, según el mecanismo involucrado, se mueva de un lugar a otro.

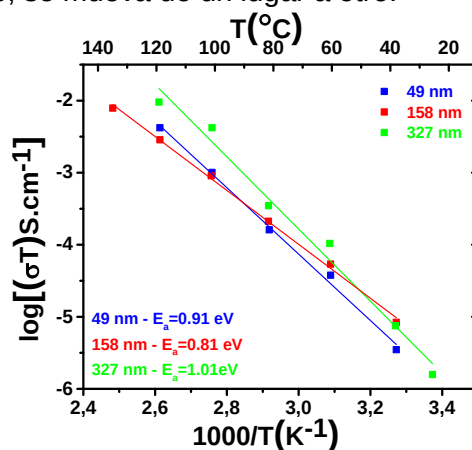


Figura 4. Diagrama de Arrhenius de la conductividad iónica para películas de NDC con diferentes espesores.

La energía de activación para las películas de NDC es mayor que la reportada en la literatura para 10% en moles de NDC (~ 0.72 eV). El comportamiento de la conductividad eléctrica y la conductividad iónica son inversamente proporcionales, por lo que el aumento en la concentración de especies redox, como el neodimio, en la estructura básica del óxido de cerio permite el transporte de especies iónicas en el contexto de generar materiales de mezcla conductividad iónica y electrónica (MIEC) de importancia creciente en la industria de celdas de combustible. Detalles del informe de avance respectivo se pueden ver en el Anexo 1-B.

Correspondiente con los objetivos 2 - 4: Sistemas YBCO/LCMO y BTO/LCMO, BFO/LCMO y (Mn,Co)ZnO/YMO

Se estudió el fenómeno de la conmutación resistiva en heteroestructuras y estructuras capacitivas combinando dos óxidos multifuncionales en forma de bicapas. Se fabricaron muestras con las siguientes bicapas constituyentes: $\text{La}_{0.3}\text{Ca}_{0.7}\text{MnO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, $\text{BaTiO}_3/\text{La}_{0.3}\text{Ca}_{0.7}\text{MnO}_3$, $\text{BiFeO}_3/\text{La}_{0.3}\text{Ca}_{0.7}\text{MnO}_3$, $(\text{Co})\text{ZnO}/\text{YMnO}_3$. En términos generales, los análisis se realizaron considerando los efectos de la variación de las condiciones de depósito, los espesores de los materiales constituyentes y el material de los electrodos sobre la respuesta en la conmutación.

Correspondiente al sistema $\text{La}_{0.3}\text{Ca}_{0.7}\text{MnO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, se fabricaron las estructuras capacitivas utilizando al YBCO como electrodo inferior, el LCMO como capa aislante y plata como electrodo superior. Se hicieron tres muestras con espesores de la capa de LCMO de 78, 39 y 19.5 nm y con la capa de espesor fijo de YBCO de 84 nm. La caracterización morfológica de las muestras indico un incremento en la rugosidad con la disminución del espesor de la capa aislante. El coeficiente de rugosidad mostró valores entre $0.5 < \alpha < 1$, indicando crecimiento texturado para las capas. Las medidas de corriente voltaje dieron como resultado conmutación resistiva bipolar con histéresis asimétrica inversa para todas las estructuras. Las muestras tuvieron un cambio en su conductancia con la aplicación del voltaje. Los detalles de estos resultados se encuentran en el Anexo 1-C. Esta investigación culminó con una tesis de maestría en Ingeniería énfasis ingeniería de materiales, que está pendiente de sustentar. Así mismo, los detalles de los resultados del sistema $\text{BaTiO}_3/\text{La}_{0.3}\text{Ca}_{0.7}\text{MnO}_3$ se encuentran en el anexo 5A.

En colaboración con la profesora Heidimarie Smith de la Universidad de Chemnitz, Alemania, se estudiaron las propiedades eléctricas y electrónicas a través de mediciones de capacitancia en función de voltaje aplicado, y corriente-voltaje en hetero-junturas tipo n-p de sistema óxidos de películas delgadas de zinc dopado con cobalto y manganeso sobre película delgada de manganita de ytrio. Las muestras fueron crecidas por deposición de laser pulsado. Se usaron los valores de 0.1, 2.0 y 5.0 en porcentaje atómico de Mn y de Co como concentración de dopante del óxido de zinc. Los estudios fueron realizados considerando dos áreas diferentes de tamaño de electrodos circulares. Se varió el espesor nominal de la película de ZnO a 240 nm y 387 nm. De las curvas de Capacitancia-Voltaje se obtuvieron valores para la concentración de donores, el voltaje built-in y espesor de la región de depleción. Se realizó un modelo de la región de depleción de acuerdo al modelamiento por tunelización de Ribben. Los valores bajos obtenidos en la concentración de donores menores que

1019 cm³ sugieren que el uso de este tipo de heterojuntura n-p Mn(Co)-doped ZnO/YMnO₃ crecidas sobre sustratos de silicio cubiertos con platino, es un posible candidato para aplicaciones ferromagnéticas a temperatura ambiente, diodos emisores de luz, fotodetectores, y celdas solares. Además, el comportamiento de histéresis observado en las curvas de capacitancia-voltaje y de corriente-voltaje indican que las heterojunturas Au/Mn(Co)-doped ZnO/YMnO₃/Pt/TiO₂//SiO_x/Si podrá ser usado en memorias resistivas de acceso aleatorio debido a que presentan el fenómeno de conmutación resistiva. Esta investigación contribuyó con la culminación de una tesis doctoral en Ciencias Físicas, Anexo 5B.

Correspondiente con el objetivo 5:

Se diseñó y se puso en marcha el sistema de adquisición automática utilizando una fuente de poder Keithley 2450 SourceMeter para automatizar medidas de corriente como función del voltaje para la identificación del efecto de conmutación resistiva (CR) y obtener la resistencia del dispositivo en los estados de alta resistencia (HRS, (de sus siglas en inglés High Resistance State) y baja resistencia (LRS, de sus siglas en inglés Low Resistance State); y demás parámetros que caracterizan el fenómeno CR: número de ciclos que el dispositivo puede mantener los dos estados de resistividad distinguibles uno del otro (llamado endurance); tiempo de retención del dispositivo, es decir tiempo en el cual el sistema mantiene uno de los dos estados sin pérdida de información. Anexo 2.

Correspondiente con los objetivos 6 - 7:

El estudio de los mecanismos de RS se realizó mediante el ajuste de las curvas corriente-voltaje obtenidas experimentalmente. Con base en los resultados obtenidos mediante estos ajustes, las medidas de impedancia, y basándonos en la fundamentación teórica de los fenómenos de transporte en sólidos dieléctricos, en los efectos que aparecen en la estructura electrónica en toda interfaz metal/aislante o metal/semiconductor o semiconductor/aislante, se pudo inferir que el mecanismo de transporte eléctrico dominante en el sistema capacitivo La_{0.3}Ca_{0.7}MnO₃/ YBa₂Cu₃O_{7-δ} utilizando electrodos de Ag, es la conducción limitada por carga espaciada o SCLC por sus siglas en inglés (*space charge limited conduction*). En esta, el movimiento de iones de oxígeno desde el óxido de LCMO hasta la interfaz con el electrodo superior de plata se debe al voltaje aplicado y a la aparición de un campo eléctrico intenso en la capa aislante; este fenómeno genera una reacción de óxido-reducción, la cual es responsable del cambio de la resistencia. Los ensayos de conmutación resistiva mostraron dos estados resistivos con cociente de ((HRS-LRS)/LRS)*100%, entre 500 % y 3000 % y un aumento del cociente cuando se disminuye el espesor de la muestra de LCMO aislante. Los detalles de estos resultados se encuentran en el Anexo 1-C.

Correspondiente con el objetivo 8:

Los resultados obtenidos fueron analizados y discutidos en seminarios de investigación; también fueron divulgados a la comunidad a través de coloquios, seis participaciones en eventos científicos nacionales e internacionales; se escribieron reportes, se publicaron artículos (2) en revistas de circulación internacional y 1 en curso para ser sometida a publicación. Se plantearon tres propuestas de investigación: una en colaboración con el SENA, otra a la convocatoria de jóvenes investigadores

e innovadores y otra en curso para presentarlo ante el Banco de la República en colaboración con universidades externas.

Principales conclusiones y/o recomendaciones

En conclusión, hemos estudiado el fenómeno de conmutación resistiva en óxidos multifuncionales. Para ello fabricamos películas delgadas de dióxido de hafnio, óxido de cerio dopado con neodimio, ferrita de bismuto y titanato de bario, manganita de lantano dopada con calcio; heteroestructuras tipo $\text{La}_{0.3}\text{Ca}_{0.7}\text{MnO}_3$ / $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, BaTiO_3 / $\text{La}_{0.3}\text{Ca}_{0.7}\text{MnO}_3$, $\text{Au/Mn(Co)-dopedZnO}$ / YMnO_3 / $\text{Pt/TiO}_2/\text{SiO}_x/\text{Si}$. Para la deposición de las capas usamos la técnica de sputtering DC a altas presiones de oxígeno disponible en el laboratorio. En colaboración con la Universidad de Chemnitz, crecimos las capas ZnO/YMnO_3 usando la técnica de ablación láser. Las capas y heteroestructuras depositadas exhiben crecimiento texturado, superficies e interfaces con baja rugosidad. Para las medidas de conmutación resistiva se hicieron los dispositivos tipo capacitor, esto es, conductor/aislante/conductor. Para la toma de datos, se adquirió una fuente de corriente y voltaje y se diseñó usando el software LabView el programa de toma automática de datos, quedando un protocolo para estas medidas en el laboratorio. A todas las muestras les realizamos las medidas eléctricas que permiten caracterizar su respuesta de conmutación resistiva, esto es, curvas corriente vs voltaje (I-V) y su proceso de electroformación, curvas de resistencia vs tiempo (R(t)), tiempo de retención. En colaboración con la Universidad de Chemnitz, Alemania y la Universidad de Florida en Gainesville (Prof. Juan Nino) realizamos en algunas muestras medidas de impedancia. Los resultados indican que las curvas I-V para todas las muestras estudiadas son asimétricas y es función de los electrodos. El análisis de esas curvas nos permite inferir sobre los diferentes tipos de mecanismos de conducción que exhiben estos materiales óxidos. Los resultados obtenidos en torno al fenómeno de conmutación dependen completamente de los materiales componentes del dispositivo. HfO_2 exhibe comportamiento bipolar y monopolar dependiendo del espesor; la razón $r(R)=R_{\text{HRS}}/R_{\text{LRS}}$ aumenta para espesores mayores a 100 nm, presentando un valor de 1.33 ± 0.09 para el dispositivo con espesor de 155 nm de HfO_2 . La conductividad del CeO dopado con Nd, mediante espectroscopia de impedancia, nos indican una conductividad iónica, pero también conductividad electrónica que se mejoran con el dopaje de Nd, el cual en la estructura básica del óxido de cerio permite el transporte de especies iónicas en el contexto de generar materiales de mezcla conductividad iónica y electrónica (de importancia creciente en la industria de celdas de combustible). En particular, el sistema Ag/LCMO/YBCO mostró conmutación resistiva bipolar a temperatura ambiente con cociente entre estados altos (HRS) y bajos de resistencia (LRS) desde 500 % hasta 3000 % indicando un incremento de la relación de estados resistivos con el aumento de la rugosidad, la disminución de la capa aislante de LCMO y el aumento del voltaje de apagado.

La realización de este proyecto ha permitido fortalecer las capacidades técnicas y científicas en el área de la conmutación resistiva, base para el desarrollo de nuevas tecnologías no-volátiles para el almacenamiento de datos, tales como la RRAMs. Permitted formar estudiantes de pregrado y posgrado de Física e Ingeniería de Materiales. Divulgamos los resultados en eventos científicos nacionales e

internacionales; publicamos artículos científicos, algunos de ellos en trámite de sometimiento y evaluación; fortalecimos colaboraciones con laboratorios avanzados; nuestros estudiantes realizaron pasantías en el laboratorio de magnetismo de la Universidad de los Andes (Prof. J. G. Ramírez). Los resultados que se van obteniendo permitieron también participar en otras convocatorias. Así se obtuvo una beca de Joven Investigador, en desarrollo; se presentó un proyecto en una convocatoria del SENA; se está sometiendo un proyecto a la Fundación Banco de la República.

La recomendación relevante es que la Universidad debe fortalecer programas de apoyo a la investigación que permita actualizar y /o adquirir equipamiento para los laboratorios de investigación, en donde se han realizado trabajos de grado, trabajos de investigación de maestría, tesis doctorales, estancias postdoc, en más de medio centenar con equipamiento que fue adquirido, esencialmente, a través de la Fundación Humboldt hace más de 30 años, y a través del Centro de Excelencia de Nuevos Materiales hace 15 años. Ese apoyo es muy importante para avanzar y poderse comprometer con publicaciones de primera línea, como lo exigen las convocatorias.

Por último, la ubicación de las revistas donde se publica, dada la metodología de Colciencias (esperar que termine el año de la publicación, solicitar categorización, esperar resultado de la indexación), no es posible cumplir con el propósito de publicar en una categoría dada.

4. Impactos actual o potencial:

Académico (aportes a la docencia, aportes a la formación de recursos humanos):

El desarrollo de este proyecto contribuyó a la formación de estudiantes de los programas de física e Ingeniería de Materiales. Se vincularon estudiantes de pregrado y posgrado, dejando como resultado la culminación de una tesis a nivel de maestría en Ciencias Físicas, una tesis doctoral en ciencias físicas, la culminación de una tesis de maestría en ingeniería énfasis en ingeniería de materiales que está pendiente por sustentar y la realización de dos propuestas de tesis de estudiantes de maestría en ingeniería énfasis en Ing. Materiales. Así mismo, se realizó una propuesta de trabajo de investigación enmarcada dentro de este proyecto del estudiante Santiago Ceballos del programa de Ing. de materiales. Adicionalmente, se presentó una propuesta a la convocatoria de Jóvenes Investigadores de COLCIENCIAS 2019, saliendo favorecido el estudiante Kevin Tamayo.

Adicionalmente, para el desarrollo del proyecto se vinculó la pasante postdoctoral Lorena Marín Mercado, quien ha colaborado en la dirección y co-dirección de tesis a nivel de maestría y pregrado,

Investigativo (divulgación de resultados)

Los resultados de este proyecto de investigación han sido presentados en eventos nacionales e internacionales. Parte de la investigación relacionada a los mecanismos de conducción eléctrica fueron publicados en la revista "materials today: proceedings", donde se publicaron dos artículos.

Desarrollos futuros

Se establecieron nexos de colaboración con el profesor Juan Gabriel Ramírez de la Universidad de los Andes y la profesora Heidimarie Smith de la Universidad de Chemnitz, Alemania. Se presentó una propuesta de investigación al SENA, saliendo favorecida para realizar investigaciones conjuntas y hacer uso de los equipos con los que cuenta el SENA. Adicionalmente, salió favorecido un Joven Investigador para continuar con la investigación en esta temática.

5. Productos:

Tabla No. 1. Cantidad y tipo de productos pactados en el *Acta de Trabajo y Compromiso* y productos finalmente presentados

TIPO DE PRODUCTOS	No. de PRODUCTOS PACTADOS				No. de PRODUCTOS PRESENTADOS			
Productos de nuevos conocimientos								
Artículo en revista ISI-SCOPUS: Publicado	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
		1						
Artículo en revista ISI-SCOPUS: Sometido. Anexo 3		1				1		
Artículo completo publicado en revistas indexadas	A1	A2	B	C	A1	A2	B	C
Formación de recursos humanos	No. de estudiantes vinculados			No. de tesis	No. De estudiantes Vinculados		No. De tesis	
Estudiantes de pregrado Anexo 4A	1				1			
Semillero de Investigación								
Estudiantes de maestría. Anexo 4B	1				3		1	
Estudiantes de doctorado. Anexo 4C					1		1	
Joven investigador. Anexo 4D					1			
Productos de divulgación								
Publicaciones en revistas no indexadas Anexo 5					2			
Ponencias presentadas en eventos (congresos, seminarios, coloquios, foros) Anexo 6	No. de ponencias nacionales		No. de ponencias internacionales		No. de ponencias nacionales		No. de ponencias internacionales	
	1				4		5	
Propuesta de investigación								



TIPO DE PRODUCTOS	No. de PRODUCTOS PACTADOS	No. de PRODUCTOS PRESENTADOS
Propuestas presentadas en convocatorias externas para búsqueda de financiación. Anexo 7.	1	3

Tabla No. 2. Detalle de productos

Tipo de producto:	Artículo Publicado
Nombre General:	Materials today proceedings (2019). Vol: 14. Pags: 88 – 91.
Nombre Particular:	Low temperature effect in diode BaTiO ₃ / La _{0.7} Ca _{0.3} MnO ₃ heterostructures
Ciudad y fechas:	San Carlos de Bariloche, Argentina 30 de mayo de 2019
Participantes:	J.S. Betancourt, J.E. Ordoñez, C. Domínguez, W. Lopera y M.E. Gómez
Sitio de información:	Online; https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319308715?via%3Dihub
Formas organizativas:	Centro de Excelencia en Nuevos Materiales, Universidad del Valle, Grupo de Películas Delgadas, Departamento de Física, Universidad del Valle, University of Geneva.
Tipo de producto:	Artículo Publicado
Nombre General:	Materials today proceedings (2019). Vol: 14. Pags: 43 – 46.
Nombre Particular:	Transport Properties in Co-doped ZnO/YMnO ₃ n-p Heterojunctions
Ciudad y fechas:	San Carlos de Bariloche, Argentina 30 de mayo de 2019
Participantes:	Margoth Lorena Torres G, Ilona Skorupa, Heidemarie Schmidt, Oliver G Schmidt, María Elena Gómez.
Sitio de información:	Online; https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319308715?via%3Dihub
Formas organizativas:	Thin Film Group, Department of Physics, Universidad del Valle, Institute of Ion Beam Physics and Materials bResearch, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Material Systems for Nanoelectronics, Technische Universität Chemnitz, Fraunhofer Institute for Electronic Nano Systems, Back-End of Line, Leibniz Institute of Photonic Technology e.V., Center of Excellence on Novel Materials, Universidad del Valle.
Tipo de producto:	Artículo Sometido
Nombre General:	ACS Applied Materials & Interfaces
Nombre Particular:	La ₂ /3Sr ₁ /3MnO ₃ Films by a BaTiO ₃ Overlayer in an Artificial Multiferroic System
Ciudad y fechas:	Sometido el 17 de mayo de 2019
Participantes:	John E. Ordoñez, Lorena Marín, Luis A. Rodríguez, Pedro A. Algarabel, José A. Pardo, Roger Guzmán, Luis Morellón, César Magén, Etienne Snoeck, María E. Gómez, Manuel R. Ibarra
Sitio de información:	www.acs.org

Formas organizativas:	Department of Physics, Universidad del Valle, Departamento de Física de la Materia Condensada, Universidad de Zaragoza, Instituto de Nanociencia de Aragón (INA), Universidad de Zaragoza, Laboratorio de Microscopías Avanzadas (LMA)-Instituto de Nanociencia de Aragón (INA), CEMES-CNRS, Toulouse Cedex, France, Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (ICMA), CSIC-Universidad de Zaragoza, Departamento de Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluidos, Universidad de Zaragoza, CENM, Universidad del Valle.
Tipo de producto:	Memorias
Nombre General:	Poster en Congreso March Meeting 2019
Nombre Particular:	Resistive switching on $\text{La}_{0.3}\text{Ca}_{0.7}\text{MnO}_3$ / $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ devices.
Ciudad y fechas:	Boston Massachusetts, 4 al 8 de marzo de 2019
Participantes:	J.S. Betancourt, J. Ordoñez, W. Sánchez, W. Lopera, K. Gross, J. Ramírez y M.E. Gómez.
Sitio de información:	Online; http://meetings.aps.org/Meeting/MAR19/Session/T70.357
Formas organizativas:	Centro de Excelencia en Nuevos Materiales, Universidad del Valle, Grupo de Películas Delgadas, Departamento de Física, Universidad del Valle, Departamento de Física, Universidad de los Andes.
Tipo de producto:	Memorias
Nombre General:	Ponencia oral en Congreso nacional de ingeniería física, 1st Applied Phys. Eng. & Innovation 2018.
Nombre Particular:	Study of resistive switching on $\text{La}_{0.3}\text{Ca}_{0.7}\text{MnO}_3$ / $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bilayers deposited by sputtering DC.
Ciudad y fechas:	Bucaramanga, Santander, 22 al 26 de 2018
Participantes:	J.S. Betancourt ^{1,2} , J. Ordoñez ² , W. Sanchez ² , W. Lopera ² , y M.E. Gomez ^{1,2} .
Sitio de información:	http://ingenieriafisica.co/
Formas organizativas:	Centro de Excelencia en Nuevos Materiales, Universidad del Valle Grupo de Películas Delgadas, Departamento de Física, Universidad del Valle.
Tipo de producto:	Memorias
Nombre General:	Poster en Conferencia SLAFES XXIII 2018
Nombre Particular:	Study of resistive switching on $\text{La}_{0.3}\text{Ca}_{0.7}\text{MnO}_3$ / $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bilayers deposited by sputtering DC.
Ciudad y fechas:	San Carlos de Bariloche, Argentina del 10 – 13 de abril 2018
Participantes:	J.S. Betancourt, J. Ordoñez, W. Sánchez, y M.E. Gómez.
Sitio de información:	https://fisica.cab.cnea.gov.ar/slafes23/
Formas organizativas:	Centro de Excelencia en Nuevos Materiales, Universidad del Valle y Grupo de Películas Delgadas, Departamento de Física, Universidad del Valle.
Tipo de producto:	Memorias
Nombre General:	Poster en Conferencia SLAFES XXIII 2018

Nombre Particular:	Study of the resistive switching effect in In/HfO ₂ /Pt capacitive devices
Ciudad y fechas:	San Carlos de Bariloche, Argentina del 10 – 13 de abril 2018
Participantes:	Quiñonez M., Ordoñez J., Arango I., Suarez L., Gómez M. E., Lopera W.
Sitio de información:	https://fisica.cab.cnea.gov.ar/slafes23/
Formas organizativas:	Centro de Excelencia en Nuevos Materiales, Universidad del Valle y Grupo de Películas Delgadas, Departamento de Física, Universidad del Valle.
Tipo de producto:	Memorias
Nombre General:	Poster en Conferencia SLAFES XXIII 2018
Nombre Particular:	Strain effect on magnetic anisotropy in articially multiferroic heterostructures
Ciudad y fechas:	San Carlos de Bariloche, Argentina del 10 – 13 de abril 2018
Participantes:	María Elena Gómez de Prieto
Sitio de información:	https://fisica.cab.cnea.gov.ar/slafes23/
Formas organizativas:	Centro de Excelencia en Nuevos Materiales, Universidad del Valle y Grupo de Películas Delgadas, Departamento de Física, Universidad del Valle.
Tipo de producto:	Memorias
Nombre General:	Poster en X International Conference on Surfaces, Materials and Vacuum
Nombre Particular:	Dynamic build- in voltage by Current Voltage analysis in Co(Mn)- doped ZnO/ YMnO ₃ n- p heterojunctions
Ciudad y fechas:	September 25th to 29th, 2017 Ciudad Juarez - Chihuahua, Mexico
Participantes:	Margoth Lorena Torres Guzmán, RajKumar Patra, Ilona Skorupa, Heidemarie Schmidth, Maria Elena Gómez
Sitio de información:	http://www.smctsm.org.mx/X_ICSMV/
Formas organizativas:	Centro de Excelencia en Nuevos Materiales, Universidad del Valle y Grupo de Películas Delgadas, Departamento de Física, Universidad del Valle.
Tipo de producto:	Memorias
Nombre General:	XXVII Congreso Nacional de Física
Nombre Particular:	Estudio del Efecto De Conmutación Resistiva En Películas Delgadas De HFO ₂
Ciudad y fechas:	Cartagena los días 3, 4, 5, 6 de Octubre de 2017.
Participantes:	Mario Fernando Quiñonez Penagos, Jhon Edward Ordoñez, Isabel Cristina Arango, Luisa Fernanda Suarez, Wilson Lopera, María Elena Gómez
Sitio de información:	https://www.xxviicnf.com.co/
Formas organizativas:	Centro de Excelencia en Nuevos Materiales, Universidad del Valle y Grupo de Películas Delgadas, Departamento de Física, Universidad del Valle.
Tipo de producto:	Memorias
Nombre General:	XXVII Congreso Nacional de Física
Nombre Particular:	Strain effects in mutiferroic heterostructures
Ciudad y fechas:	Cartagena los días 3, 4, 5, 6 de Octubre de 2017.
Participantes:	M. E. Gómez

Sitio de información:	https://www.xxviicnf.com.co/
Formas organizativas:	Thin Film Group, Department of Physics and Center of Excellence on Novel Materials, CENM, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
Tipo de producto:	Memorias
Nombre General:	XXVII Congreso Nacional de Física
Nombre Particular:	Estudio de las Propiedades de Transporte De N-P Heterojunturas Del Sistema Zn Dopado CO(MN)O/YMNO ₃ .
Ciudad y fechas:	Cartagena los días 3, 4, 5, 6 de Octubre de 2017.
Participantes:	Margoth Lorena Torres Guzmán, Rajkumar Patra, Oliver G Schmidt, Heidemarie Schmidh, María Elena Gómez De Prieto,
Sitio de información:	https://www.xxviicnf.com.co/
Formas organizativas:	Centro de Excelencia en Nuevos Materiales, Universidad del Valle y Grupo de Películas Delgadas, Departamento de Física, Universidad del Valle.
Tipo de producto:	Tesis de Maestría
Nombre General:	Tesis de maestría
Nombre Particular:	Estudio de los efectos de la conmutación resistiva en dispositivos tipo capacitor de In/HfO ₂ /Pt.
Ciudad y fechas:	Cali, junio 07 de 2019
Participantes:	Mario Fernando Quiñonez, María Elena Gómez De Prieto, John Edward Ordoñez
Sitio de información:	
Formas organizativas:	Grupo de Películas Delgadas, Departamento de Física, Universidad del Valle, Centro de Excelencia en Nuevos Materiales.
Tipo de producto:	Tesis de Doctorado
Nombre General:	Tesis doctoral
Nombre Particular:	Study of interfacial electronic structures by capacitance voltage and current voltage analysis in Mn(Co)-doped ZnO/YMnO ₃ n-p heterojunctions.
Ciudad y fechas:	Cali, abril 04 de 2019
Participantes:	Margoth Lorena Torres , María Elena Gómez De Prieto.
Sitio de información:	
Formas organizativas:	Grupo de Películas Delgadas, Departamento de Física, Universidad del Valle, Centro de Excelencia en Nuevos Materiales.
Tipo de producto:	Propuesta Tesis de maestría
Nombre General:	Propuesta Tesis de maestría en Ingeniería énfasis Ing. Materiales
Nombre Particular:	Estudio de las propiedades estructurales, morfológicas y eléctricas de películas delgadas de CeO ₂ :Nd depositadas por pulverización catódica asistida por rf
Ciudad y fechas:	Cali, junio 21 de 2019. Entregada propuesta en la Escuela.
Participantes:	Luisa Fernanda Suarez, María Elena Gómez De Prieto.
Sitio de información:	

Formas organizativas:	Grupo de Películas Delgadas, Departamento de Física, Universidad del Valle, Centro de Excelencia en Nuevos Materiales.
Tipo de producto:	Propuesta Tesis de maestría
Nombre General:	Propuesta Tesis de maestría en Ingeniería énfasis Ing. Materiales
Nombre Particular:	Fabricación y caracterización de nanoestructuras de óxido semiconductor obtenidas por tratamientos a partir de películas de cobre.
Ciudad y fechas:	Cali, junio 21 de 2019. Entregada propuesta en la Escuela.
Participantes:	Kevin Tamayo, María Elena Gómez De Prieto, Lorena Marin
Sitio de información:	
Formas organizativas:	Grupo de Películas Delgadas, Departamento de Física, Universidad del Valle, Centro de Excelencia en Nuevos Materiales.
Tipo de producto:	Tesis de Maestría Culminada
Nombre General:	Tesis de maestría en Ingeniería énfasis Ing. Materiales
Nombre Particular:	Estudio de la conmutación resistiva en heteroestructuras Ag/La _{0.3} Ca _{0.7} MnO ₃ /YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} /SrTiO ₃ fabricadas por sputtering DC
Ciudad y fechas:	Santiago de Cali, Junio 2019. Pendiente de entregar en el programa.
Participantes:	John Schneider Betancourt Ramírez. María Elena Gómez y John E. Ordoñez
Sitio de información:	
Formas organizativas:	Centro de Excelencia en Nuevos Materiales CENM, Universidad del Valle, 2Grupo de Películas Delgadas, Departamento de Física.
Tipo de producto:	Propuesta Trabajo de Grado
Nombre General:	Propuesta trabajo de grado Ing. Materiales
Nombre Particular:	Estudio del fenómeno de conmutación resistiva en dispositivo tipo capacitor basados en óxidos multifuncionales.
Ciudad y fechas:	Cali, Mayo 9 de 2019 Entregada propuesta en el programa.
Participantes:	Santiago Ceballos, Lorena Marín
Sitio de información:	
Formas organizativas:	Centro de Excelencia en Nuevos Materiales CENM, Universidad del Valle, Grupo de Películas Delgadas, Departamento de Física.

La presente versión del informe contiene las observaciones de los evaluadores:

K. Pross

Firma del investigador principal

VoBo. Vicedecano de Investigaciones

Por favor presente su informe impreso y en formato digital en hoja tamaño carta, letra arial 11, con espacios de 1 1/2