

Estudio de propiedades eléctricas y magnéticas de $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ para desarrollo de sensores magnéticos

ISABEL CRISTINA ARANGO GUTIERREZ



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERA ÉNFASIS EN INGENIERA DE MATERIALES
SANTIAGO DE CALI
SEPTIEMBRE DE 2017

**Estudio de propiedades eléctricas y magnéticas de $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$
para desarrollo de sensores magnéticos**

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
DE MAESTRÍA ÉNFASIS EN INGENIERIA DE MATERIALES

Isabel Cristina Arango Gutiérrez
Grupo de Películas Delgadas
Universidad del Valle

María Elena Gómez de Prieto
Directora

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Programa de Maestría en Ingeniería Énfasis en Ingeniería de Materiales
SEPTIEMBRE 2017

A mi padre: Carlos Arango

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme culminar esta meta, por la sabiduría y la fortaleza que me brindó para afrontar los momentos difíciles de mi carrera.

A mis padres Carlos Arango y Esperanza Gutiérrez con quienes siempre he contado incondicionalmente. A mi hermano Carlos Eduardo Arango por creer en mí. A Ian Marsel Quijano Ospina por su apoyo, comprensión y amor.

A mi directora María Elena por su apoyo, conocimientos y experiencias aportadas en este proyecto y permitir mi participación en GPD.

A Claribel Domínguez y John Edward Ordoñez por su amistad y gran apoyo en el desarrollo y escritura de este documento.

A los profesores de GPD: Pedro Prieto, Wilson Lopera y Gustavo Zambrano, por sus importantes aportes y sugerencias en mi proceso de formación e igualmente a Cesar Amaya, Mario Quiñonez y a todos los miembros del grupo de películas delgadas

A mis jurados de este trabajo de investigación por sus aportes.

A la profesora Alba Ávila de la escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad de los Andes por su colaboración.

A la escuela de física de la Universidad de Geneva en Suiza por el uso de infraestructura e insumos en la elaboración de los dispositivos.

A los proyectos con los que se financió parte de mi investigación No. 110656933104 CI 7917 de Colciencias, el proyecto CI 7978 de la Universidad del Valle. Al Centro de Excelencia en Nuevos Materiales (CENM) en especial al Ing. John Schneider por su dedicación y apoyo en las medidas.

A todos, muchas gracias.

NOTA DE APROBACIÓN

El trabajo de investigación titulado: *“Estudio de propiedades eléctricas y magnéticas de $La_{2/3}Sr_{1/3}MnO_3$ para desarrollo de sensores magnéticos”*, presentado por: Ing. Isabel Cristina Arango Gutiérrez, para optar al título de Maestra en Ingeniería énfasis en Ingeniería de Materiales, fue revisado por el jurado y calificado como:

Firma del Evaluador

Firma del Evaluador

Firma del Director

Cali, Septiembre de 2017

RESUMEN

La espintrónica ha abierto un abanico de expectativas para posibles aplicaciones y fabricación de dispositivos basados en los efectos asociados al espín del electrón. Uno de los compuestos más ampliamente estudiados desde esta perspectiva son los óxidos altamente correlacionados como el caso de las manganitas de valencia mixta. El compuesto $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ (LSMO) posee una temperatura de Curie sobre la temperatura ambiente haciéndolo el más deseable de la familia de las perovskitas. Además, sus propiedades de transporte son deseables para aplicaciones prácticas en dispositivos como sensores magnéticos. Sin embargo, es bien conocido que al reducir las dimensiones de escala de estos materiales se reduce a su vez sus propiedades ferromagnéticas y son debilitadas. En esta investigación, obtuvimos películas delgadas de $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ sobre sustratos de SrTiO_3 por la técnica de sputtering asistida por DC en altas presiones de oxígeno a una temperatura de sustrato de 830°C. Posteriormente, se realizó un análisis por difracción de rayos x (XRD) revelando solo picos (00l) del LSMO, indicando así un crecimiento texturado de esta película. Las muestras posteriormente fueron morfológicamente caracterizadas por microscopia de fuerza atómica (AFM) obteniendo una rugosidad RMS de $1,90 \pm 0,05 \text{ nm}$, es decir cerca de 5 parámetros de red. Adicionalmente, se estructuraron las muestras para obtener dispositivos en forma de hilo por la técnica de litografía óptica; los dispositivos constan de canales bien definidos para aplicar corriente y voltaje y realizar medidas de resistencia en forma de cuatro puntas. Se grafica la resistividad en función de la temperatura para los dispositivos obteniendo comportamientos típicos de estas manganitas en forma bloque con transición metal aislante $\sim 350 \text{ K}$. Estudiamos las propiedades eléctricas y de magnetotransporte en la película de LSMO(25nm)/STO y los dispositivos en forma de hilo de este mismo material respecto a su dependencia con el tamaño (ancho y largo) para potencial aplicaciones como sensores magnéticos.

ABSTRACT

Spintronics has opened high expectations for possible applications and fabrication of devices based on the effects associated with electron spin. One of the most widely studied compounds from this perspective is the highly correlated oxides such as mixed valence manganites. The $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ (LSMO) with Curie temperature above room temperature is the leading compound of the manganite perovskite family. Therefore, the physical properties are desirable for practical applications as magnetic sensors. However, when the dimensions are reduced the ferromagnetic properties of material are weakened. In this research, we have grown $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3/\text{SrTiO}_3$ thin films by sputtering DC at high oxygen pressure at 830°C . X-ray diffraction (XRD) analysis reveals that only (00/) LSMO peak are present, indicating a textured growth. The samples morphology was characterized by atomic force microscopy (AFM). We determined the RMS roughness of $1.90 \pm 0.05\text{nm}$, around 5 lattice parameters. Additionally, LSMO microwires were patterned by UV lithography; the devices are a well-defined channel with current and voltage leads enabling four point resistance measurements. Resistivity versus temperature curves displays typical manganite behaviour with metal-insulator transition $\sim 350\text{K}$. We study the electric and magnetotransport properties in LSMO(25nm)/STO film and in wire channel and their dependence with size (width and length) for potential applications like magnetic sensors.

CONTENIDO

CAPITULO I:

GENERALIDADES.....	15
1. INTRODUCCIÓN.....	15
2. MARCO TEÓRICO.....	18
2.1. ESTRUCTURA CRISTALINA	18
2.2. ESTRUCTURA ELECTRÓNICA.....	19
2.3. EFECTO DEL DOPAJE	20
2.4. MAGNETORRESISTENCIA.....	23
2.4.1. MAGNETORRESISTENCIA COLOSAL (CMR).....	23
2.5. DESARROLLO DE DISPOSITIVOS.....	25
2.5.1. LITOGRAFÍA	25
2.6. DISPOSITIVOS.....	26

CAPITULO II

OBJETIVOS	29
1. OBJETIVO GENERAL.....	29
2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	29
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	30

CAPITULO III

METODOLOGIA EXPERIMENTAL	32
1. PREPARACIÓN DE LAS PELÍCULAS DELGADAS.....	32
2. CARACTERIZACIÓN	34
2.1. CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL	34
2.2. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA.....	35

2.3. CARACTERIZACIÓN PROPIEDADES ELÉCTRICAS	39
2.4. CARACTERIZACIÓN PROPIEDADES MAGNÉTICAS	39
3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS	41
4. PREPARACIÓN DEL DISPOSITIVO.....	42
CAPITULO IV	
RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	44
1. CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL.....	45
1.1. CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL BLOQUE	45
1.2. CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL EN PELÍCULA DELGADA	47
2. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA	49
3. CARACTERIZACIÓN MAGNÉTICA	54
3.1. CURVA DE DESMAGNETIZACIÓN TÉRMICA	54
3.2. HISTERESIS MAGNÉTICA	57
4. CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA	59
5. FABRICACIÓN DE DISPOSITIVOS.....	65
6. CARACTERIZACIÓN DE DISPOSITIVOS	68
CAPITULO V	
CONCLUSIONES.....	74
CAPITULO VI	
DIVULGACIÓN CIENTÍFICA.....	76
BIBLOGRAFÍA	80

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO I

GENERALIDADES

Figura 1. 1 Diagrama ilustrativo del área de espintrónica, fenómenos y dispositivos basados en ella.	16
Figura 1. 2. Estructura cubica tipo perovskita.....	18
Figura 1. 3 Esquema de los niveles de energía 3d de los iones Mn (Panwar, Coondoo, Sen, & Agarwal, 2011).	20
Figura 1. 4 Diagrama de fases del sistema $\text{La}_{1-x}\text{M}_x\text{MnO}_3$ (M= Sr) (Haghir-Gosnet & Renard, 2003).	21
Figura 1. 5 (a) Dependencia de la temperatura y la resistividad de la familia $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$, (b) Películas delgadas de compuestos $\text{A}_{0.7}\text{B}_{0.3}\text{MnO}_3$. (Urushibara A. , Moritomo, Arima, Asamitsu, & G, 1995)	22
Figura 1. 6 Dependencia de la resistividad con la temperatura con varios campos magnéticos para $\text{La}_{0.7}(\text{Ca}_{1-y}\text{Sr}_y)_{0.3}\text{MnO}_3$ para $y=0,1$	24
Figura 1. 7 Microestructura de LSMO/STO por proceso de microlitografía UV.	26
Figura 1. 8 La respuesta de MR a baja temperatura de un $2,5 \times 12.5\mu\text{m}^2$ de LSMO / STO / LSMO y la LFMR de una capa individual en LSMO para comparación (Haghir-Gosnet & Renard, 2003).	27
Figura 1. 9 (a) Película LSMO sobre sustrato de Al_2O_3 , con la configuración de puente de Wheatstone y (b) Señal de salida del potenciómetro durante la rotación de los imanes (Bacells, Carrillo, Martinez, Sandiumenge, & Fontcuberta, 2000). .	28

CAPITULO III

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Figura 3. 1 Esquema litografía para medición por método de cuatro puntas	41
Figura 3. 2 Sistema de deposición por sputtering DC.	33
Figura 3. 3 Proceso de elaboración de dispositivo	43
Figura 3. 4 Fotografía del equipo de rayos X de la marca X’pert Pro de Panalitycal que se encuentra en la Universidad del Valle	34
Figura 3. 5 Fotografía del Microscopio de Fuerza Atómica MFP-3D Asylum Research disponible en el <i>CENM</i>	36
Figura 3. 6 Diagrama del perfil de superficies. Se identifica el tamaño de ventana L , rugosidad local $\sigma_L(x_0)$, y longitud de correlación λ	37
Figura 3. 7 (a) Configuración de contactos para medida de resistividad para sustratos cuadrados. La diferencia de potencial se mide en los puntos interiores de la línea que une los cuatro contactos, pues es en esta posición donde el voltaje es más fuerte. (b) puck o portamuestras de contacto del sistema PPMS Quantum Design.	39
Figura 3. 8 (a) Imagen del PPMS de la marca Quantum Design TM , ubicado en el Centro de Excelencia en Nuevos Materiales – UNIVALLE. (b) Montaje del Magnetómetro de muestra vibrante, se observa el motor lineal y el conjunto de bobinas de detección.	40

CAPITULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Figura 4. 1 Patrón de difracción de rayos X para la muestra en bloque, en donde el espectro negro corresponde al obtenido experimentalmente y el espectro rojo al calculado teóricamente	46
Figura 4. 2 Patrón de difracción de la capa de LSMO. Debido a la similitud entre los parámetros de red, las muestras presentan un crecimiento texturado sobre el sustrato.	47

Figura 4. 3 Reflectividad de difracción de rayos x	48
Figura 4. 4 Ajuste lineal en una gráfica $\text{Sen}^2\theta$ en función de $(n+k)^2$	49
Figura 4. 5 Imágenes de AFM 2D y 3D de la película LSMO/STO para diferentes tamaños de ventana: a) 8x8um b) 5x5um c) 3x3um d) 1x1um y e) 500x500nm. ...	51
Figura 4. 6 a) Rugosidad en función del tamaño de ventana L, para los diferentes tamaños de imágenes D. b) Parámetros obtenidos del ajuste en función del tamaño de ventana L.....	52
Figura 4. 7 Dependencia de la magnetización como función de la temperatura en un rango de 10 a 400 K bajo condiciones de ZFC ($H_{FC}=0$ Oe) y FC ($H_{FC}=1000$ Oe) para el LSMO.	55
Figura 4. 8 a) Isotermas de histéresis magnética (desde 10K hasta 350K), b) campo coercitivo y c) Magnetización de saturación en función de la temperatura.	58
Figura 4. 9 Magnetización y resistividad en función de la temperatura para una capa delgada de LSMO crecida sobre STO. Ambas curvas fueron medidas de baja a alta temperatura.	60
Figura 4. 10 Dependencia de la Resistividad en función de la temperatura para la muestra LSMO/STO, con diferentes campos magnéticos aplicados, en donde se observa una disminución de la resistividad al incrementar el campo magnético aplicado.....	61
Figura 4. 11 Ajustes de la resistividad en función de la temperatura para bajas temperaturas mediante la expresión: $\rho T = \rho_0 + AT\alpha$	62
Figura 4. 12 Dependencia de la Resistividad con el campo magnético aplicado a temperaturas en la región ferromagnética de la película de LSMO.....	63
Figura 4. 13 Porcentaje de magnetorresistencia en función del campo magnético aplicado a una temperatura de 350K.	64
Figura 4. 14 Curvas de corriente en función del voltaje a 50K y 300K para la película delgada LSMO/STO.....	65
Figura 4. 15 (a) Esquema del dispositivo, imágenes SEM: (b) de los cuatro dispositivos estructurados por litografía óptica y (c) diferentes anchos y largos de los dispositivos.	67

Figura 4. 16 Resistividad en función de la temperatura para cada relación a/l con diferentes campos magnéticos aplicados: (a)	68
Figura 4. 17 Resistividad en función de la temperatura para los diferentes campos magnéticos aplicados a cada relación a/l : (a) 0,033, (b) 0,066, (c) 0,083 y (d) 0,167.	69
Figura 4. 18 (a) Resistividad residual ρ_0 y (b) exponente de dispersión α a baja temperatura como función de la relación ancho/largo (a/l).	71
Figura 4. 19 Dependencia de la Resistividad con el campo magnético aplicado a temperaturas en la región ferromagnética del LSMO (a) $T=300K$ y (b) $T=350K$ para los cuatro dispositivos estructurados.	72
Figura 4. 20 Magnetorresistencia (MR%) en función de la relación ancho/largo (a/l) para diferentes campos magnéticos aplicados.	73

LISTA DE TABLAS

CAPITULO I

GENERALIDADES

Tabla 1.1. Resolución de técnicas de litografía	25
---	----

CAPITULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Tabla 4. 1 Parámetros refinamiento Rietveld	46
Tabla 4. 2 Parámetros obtenidos del ajuste para diferentes tamaños de imagen L.	53
Tabla 4. 3 Temperaturas de transición T_C de y ΔT para condiciones de ZFC y FC ($H_{FC}=1000$ Oe).	57
Tabla 4. 4 Dimensiones ancho y largo de dispositivo estructurados por OL.	66

CAPITULO I: GENERALIDADES

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo en el área de ciencia e ingeniería, ha permitido entender las propiedades de los materiales y así poder aplicarlas en campos tanto científicos como tecnológicos, resaltando que estas propiedades dependen del método de procesamiento. La nanotecnología utiliza un amplio rango de disciplinas científico-técnicas con el fin de estudiar materiales, partículas y estructuras que implican la creación o presencia de elementos que tienen al menos una dimensión espacial inferior a los 100nm. De esta forma, la obtención de materiales en forma de película delgada, es decir, en la escala nanométrica permite estudiar nuevas propiedades como resultado de la disminución en sus dimensiones, generando de esta forma soluciones innovadoras a diferentes problemas que se presentan en la ingeniería específicamente en el área de nanotecnología.

Uno de estos problemas es la creciente demanda que se presenta en el desarrollo nanotecnológico, por esta razón al reducir el tamaño de los materiales, es posible adquirir nuevas propiedades, que pueden ser utilizadas para diseñar sistemas y/o optimizar otros ya conocidos, por ejemplo, láseres, discos duros, sensores, etc [1]. El interés en el desarrollo de estos dispositivos espintrónicos ha fomentado la búsqueda de materiales en la escala nanométrica, donde efectivamente las propiedades magnéticas y de transporte difieren de las de los materiales en estado macroscópico. Técnicas tipo “*top-down*” (de arriba hacia abajo) y “*bottom-up*” (de abajo hacia arriba) son las empleadas cuando hablamos de nanotecnología. Se basan en la manipulación física de las materiales de volumen y superficie, así como también de las interfaces; superficies de contacto entre dos materiales diferentes. Para esto es necesario utilizar técnicas como la litografía por haz de iones (FIB), electrones (EBL), rayos-x (DXRL) y óptica.

En los últimos años, la conducción electrónica y los fenómenos asociados con el espín del electrón han sido tratados de forma separada en la mayoría de los casos. De esta forma, la investigación científica ha dado lugar por un lado a la microelectrónica y por otro a las aplicaciones del magnetismo. El desarrollo de técnicas de preparación que permiten desarrollar sistemas nanoestructurados cada vez de mejor calidad ha abierto el camino hacia una nueva disciplina conocida como espintrónica [2], donde la conducción electrónica y el espín se conjugan para dar lugar a una gran riqueza de nuevos efectos (Fig 1.1).

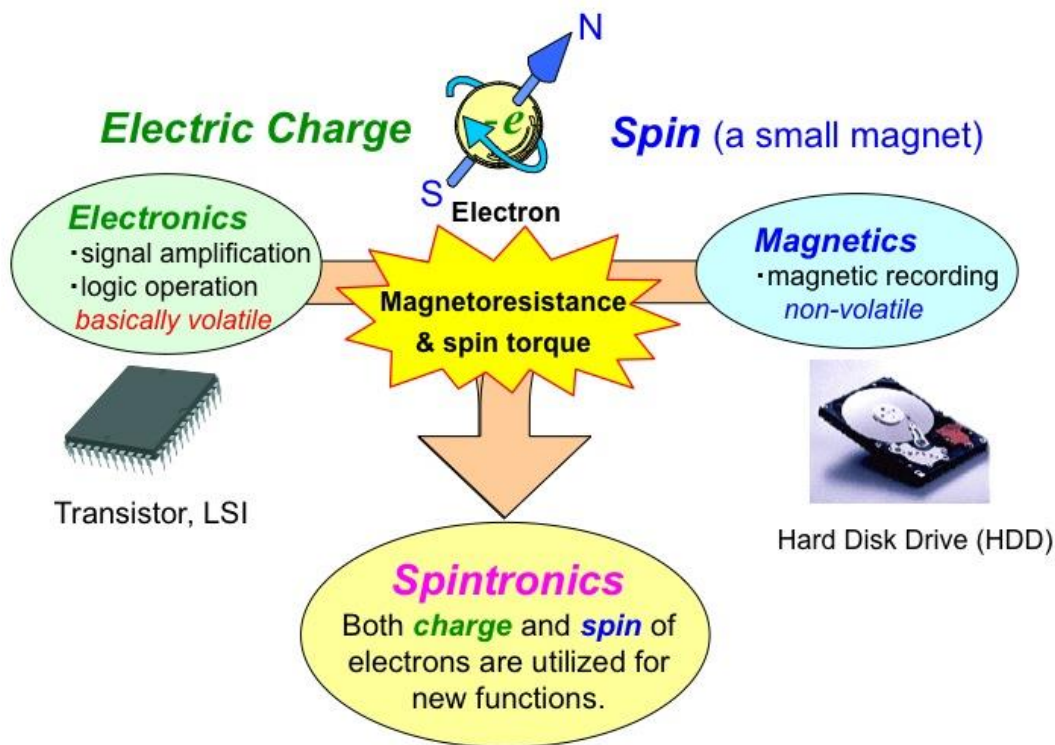


Figura 1. 1 Diagrama ilustrativo del área de espintrónica, fenómenos y dispositivos basados en ella.

Esta rama abre un abanico de expectativas para posibles aplicaciones y fabricación de dispositivos basados en los efectos asociados al espín del electrón. Uno de los compuestos más ampliamente estudiados desde esta perspectiva son los óxidos altamente correlacionados como el caso de las manganitas de valencia mixta.

Los óxidos de manganita de lantano con formula general $\text{La}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$ ($\text{A} = \text{Sr}$) tienen propiedades muy interesantes interrelacionadas con su estructura y tipo de dopaje, además poseen propiedades eléctricas, magnéticas y de transporte inducidas por su valencia mixta de los iones de Mn. En particular, estos óxidos exhiben altos valores de magnetorresistencia, llamada magnetorresistencia colosal (CMR) [3]. La magnetorresistencia es la propiedad de los materiales para cambiar su resistencia eléctrica en presencia de un campo magnético [4]. Esta propiedad ha propiciado el desarrollo de nuevas aplicaciones, la creación de dispositivos como sensores de campo magnético, la producción de memorias magnéticas, detectores de infrarrojo, entre otros [5] [6].

Con el fin de desarrollar nanodispositivos que se caractericen por presentar propiedades magnéticas, y eléctricas adecuadas para su uso en desarrollo de dispositivos de control: como los sensores magnéticos. En este trabajo de investigación se plantea el diseño de películas delgadas de manganita de lantano dopada con estroncio del tipo $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$, las cuales serán empleadas para la fabricación de microhilos con diferentes longitudes y espesores a partir del uso de técnicas de litografía, concretamente la fotolitografía. Para tal efecto se llevará a cabo un diseño de experimentos en el que este material será el factor de estudio y se evaluará a diferentes niveles, manteniendo constantes ciertos parámetros de crecimiento (temperatura de sustrato, distancia entre electrodos, presión de trabajo, atmosfera de oxígeno, corriente). Así mismo, con el fin de evaluar el efecto de reducción de tamaño en las propiedades magnéticas se disminuirá el volumen del material.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. ESTRUCTURA CRISTALINA

La familia de las perovskitas está conformada por un gran número de compuestos cuyo nombre proviene del mineral CaTiO_3 . La fórmula general de una estructura de este tipo es ABO_3 y su estructura consiste en una red cubica formada por tres elementos químicos presentes en una relación 1:1:3. Los átomos A y B son cationes metálicos, y usualmente el catión A es de mayor tamaño. Existen una gran cantidad de compuestos que cumplen con esta relación elemental, pero muchos de ellos no se ajustan a la estructura del titanato de calcio [7].

En la figura 1.2 se muestra la estructura cubica ideal de un óxido tipo perovskita. El catión del centro hace referencia al grupo lantánido en el caso de las manganitas de lantano, los cationes de manganeso se ubican en los vértices, y los oxígenos en las posiciones medias de las aristas. Con respecto a los oxígenos, el catión del grupo lantánido presenta una coordinación dodecaédrica, mientras que el catión del manganeso (Mn) presenta una coordinación octaédrica. En esa estructura los cationes del Mn se encuentran rodeados de seis aniones oxígeno, formando octaedros regulares MnO_6 , de tal forma que el ángulo de enlace Mn-O-Mn es de 180° [3].

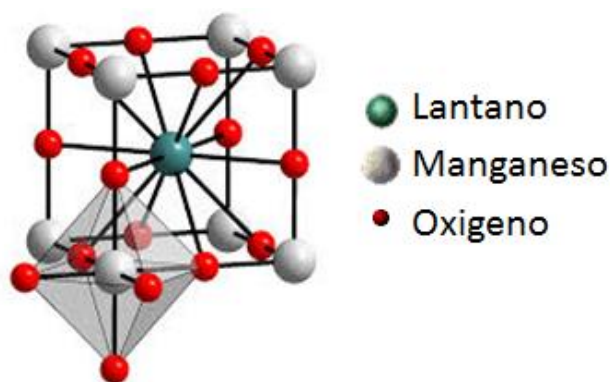


Figura 1. 2. Estructura cubica tipo perovskita.

2.2. ESTRUCTURA ELECTRÓNICA

Las principales características físicas de las manganitas están fundamentadas en la estructura electrónica del manganeso. En una manganita sin dopaje, únicamente se tienen iones Mn^{+3} con configuración electrónica $(\text{Ar})3d^4$, al dopar se reemplaza una cantidad X del catión $+3$ por el catión $+2$ y como consecuencia aparece entonces una fracción X de Mn^{+4} , con configuración electrónica $(\text{Ar})3d^3$. Introduciendo de esta forma X de huecos en el sitio de manganeso.

Si se considera de manera aislada los cationes Mn^{+3} y Mn^{+4} , ambos tienen degeneración en los cinco orbitales $3d$. Debido a la interacción de Hund los electrones en los orbitales $3d$ se acoplan al máximo espín total posible ($S=2$ para Mn^{+3} ó $S=3/2$ para Mn^{+4}), con el fin de minimizar la repulsión de *Coulomb*. Cuando se considera a estos cationes inmersos en el sólido dentro de los octaedros de oxígeno, la fuerte repulsión *Coulombiana* ejercida por los iones O^{2-} sobre los electrones $3d$ afecta drásticamente este panorama. Esta interacciones se denomina campo cristalino (CC), y es aproximadamente 3 órdenes de magnitud más importante que la interacción spin-orbita (SO) [3]. Debido al CC, los orbitales relevantes desde el punto de vista de la mecánica cuántica (los que diagonalizan el Hamiltoniano) ya no poseen proyección de momento angular (L_z) bien definida, sino que todos ellos poseen valor medio nulo, $(L_z)=0$, por lo que $J=S$. Dichos orbitales se dividen en dos grupos t_{2g} y e_g . Si se definen los ejes (x,y,z) en las direcciones de los oxígenos los orbitales t_{2g} toman forma d_{xy} , d_{zz} , d_{yz} y los máximos de densidad de carga están a 45° de los ejes, mientras que los orbitales e_g toman la forma $d_{x^2-y^2}$ y d_{z^2} ($3z^2 - r^2$) con máximos de densidad de carga sobre los ejes, como se observa en la figura 1.3. Por lo tanto, los orbitales $3d$ que inicialmente se encontraban degeneradas se desdoblan ahora en 2 niveles cuya diferencia de energía se denomina gap de campo cristalino y es del orden de 1,5 eV [8].

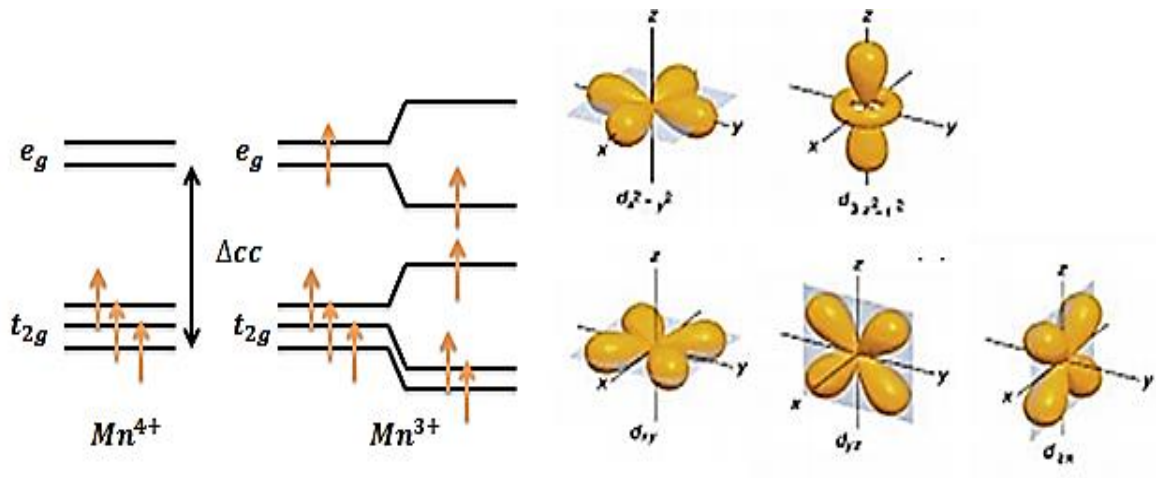


Figura 1. 3 Esquema de los niveles de energía 3d de los iones Mn [9].

2.3. EFECTO DEL DOPAJE

El diagrama de fases del sistema $La_{1-x}A_xMnO_3$ ($A = Ca, Sr$) (Figura 1.4) fue estudiado en el rango completo de dopaje de $0 < x < 1$ por Schiffer en 1995 [10] [11] se obtuvo a través de medidas de magnetización y resistividad en un rango desde bajas temperaturas hasta temperatura ambiente, y así mismo encontraron una significativa sensibilidad de estas dos propiedades a campos magnéticos aplicados a este compuesto.

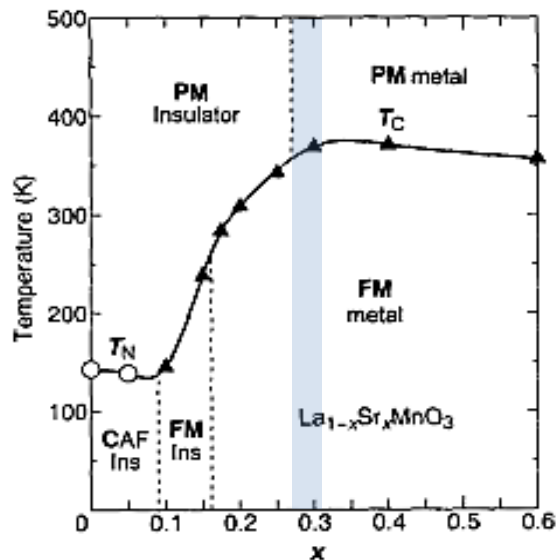


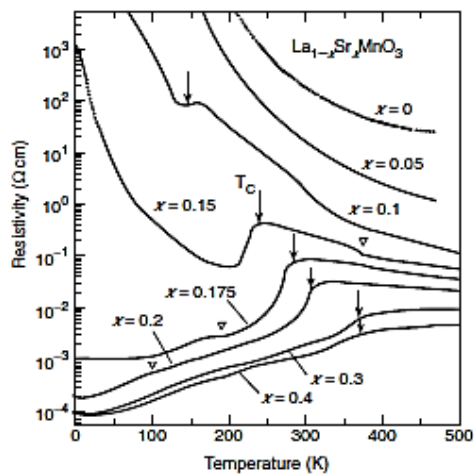
Figura 1. 4 Diagrama de fases del sistema $\text{La}_{1-x}\text{M}_x\text{MnO}_3$ ($\text{M} = \text{Sr}$) [3].

El compuesto original LaMnO_3 es aislante, y su transición al estado conductor se da por medio del dopaje. El compuesto de $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ (LSMO) sufre una transición desde un estado paramagnético (PM) de alta temperatura a un estado antiferromagnético (AF) a una temperatura $T_N = 110\text{K}$, por debajo de la cual los espines de los iones Mn^{+3} se alinean ferromagnéticamente (FM) en los planos perpendiculares a la dirección c del cristal pero se mantiene antiparalelos entre planos, $x=0.05$ [3]. El intervalo más interesante desde el punto de vista tecnológico es el rango comprendido entre $0.2 < x < 0.5$. Los sistemas $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ presentan un comportamiento PM-I por encima de la temperatura de orden ferromagnético, (T_c , temperatura de curie) y FM-M por debajo de esta. En nuestro estudio nos centramos en la concentración de $x=1/3$, donde se presenta el ordenamiento FM más estable con la T_c más alta.

Para cierto rango de dopaje x las manganitas presentan transiciones metal-aislante (M-I). En la figura 1.5. Se muestra como ejemplo de este fenómeno curvas de resistividad en función de la temperatura de compuestos de LSMO en material en bloque -bulk (Figura 1.5(a)) y de diferentes familias de manganitas de dopaje

$x=0.3$ en películas delgadas (Figura 1.5 (b)). Se observa en los compuestos en bloque que al aumentar el dopaje la resistividad disminuye varios ordenes de magnitud. En un rango intermedio, $0.17 \leq x \leq 0.3$ como se mostró en su diagrama de fases, la transición de orden magnético está acompañada de una transición M-I. En las Figuras 1.4 y 1.5, esta transición se observa para dopajes mayores. Estas manganitas presentan un gran cambio de pendiente en su resistividad cerca de T_C pero todavía con un comportamiento metálico en su fase PM en el rango de temperaturas menos a 400K. En el caso de películas delgadas (Figura 1.5 (b)), las manganitas más resistivas también presentan claramente una transición metal-aislante. En el caso de $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ se observa a una temperatura cercana a 360K que la pendiente de la resistividad cambia de signo mostrando entonces una transición M-I.

a)



b)

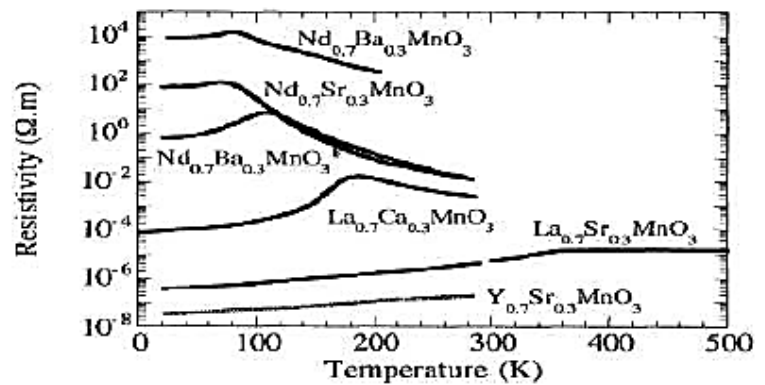


Figura 1. 5 (a) Dependencia de la temperatura y la resistividad de la familia $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$, (b) Películas delgadas de compuestos $\text{A}_{0.7}\text{B}_{0.3}\text{MnO}_3$. [12]

2.4. MAGNETORRESISTENCIA

En el desarrollo de la espintrónica se han descubierto nuevos fenómenos, y es en este escenario donde los óxidos de manganita de valencia mixta han presentado propiedades de magnetorresistencia intrínsecas como es la magnetorresistencia colosal (CMR) [13], y combinados en estructuras más complejas pueden presentar contribuciones de extrínsecas como la magnetorresistencia gigante (GMR) y la magnetorresistencia túnel (TMR) [14]. Por ello, en esta sección describiremos el fenómeno de magnetotransporte que presentan los materiales magnéticos metálicos o semiconductores de forma intrínseca.

2.4.1. MAGNETORRESISTENCIA COLOSAL (CMR)

Es un efecto intrínseco que aparece en ciertos materiales en los que existe una fuerte correlación entre las propiedades magnéticas y las de conducción electrónica [3]. Algunos ejemplos de CMR son entre otros las perovskitas de manganeso de valencia mixta, los pirocloros o las dobles perovskitas. En estos materiales semimetálicos el cambio en la resistencia es debido a una transición M-I. Se manifiesta por una disminución de la resistividad al aplicar un campo magnético externo que disminuye el desorden magnético del sistema. Así el signo de la CMR es siempre negativo, es decir, la resistividad disminuye al aumentar el campo. Usualmente la CMR se define como:

$$CMR = \frac{R(0) - R(H)}{R(0)} \times 100 \quad 1.1$$

Donde $R(0)$ y $R(H)$ son los valores de resistencia sin campo y con campo H , respectivamente para una temperatura dada. En la figura 1.6 se muestra el

descenso de la resistividad $\rho(T)$ observada en $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ alrededor de T_c reportada por algunos investigadores. Este compuesto muestra el comportamiento típico de las manganitas que presentan CMR; a altas temperaturas una resistividad tipo aislante que cae hasta dos órdenes de magnitud por debajo de la T_c , donde adquiere un régimen metálico. La manganita $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ tiene un comportamiento CMR más débil, caso de $y=1$ en la figura 1.6.

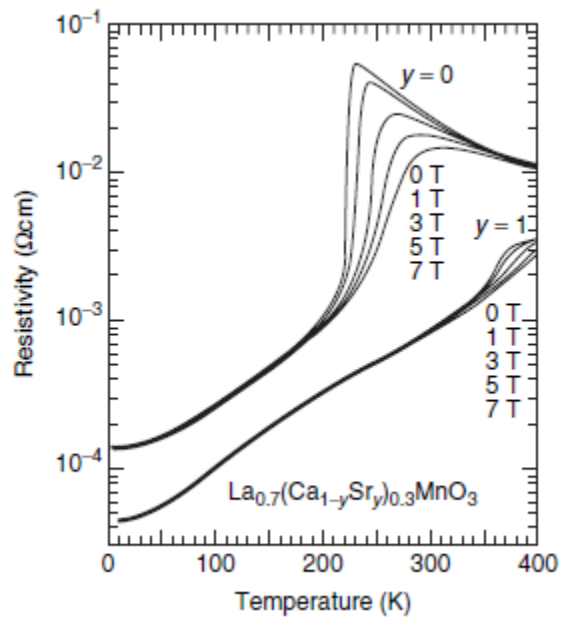


Figura 1. 6 Dependencia de la resistividad con la temperatura con varios campos magnéticos para $\text{La}_{0.7}(\text{Ca}_{1-y}\text{Sr}_y)_{0.3}\text{MnO}_3$ para $y=0,1$.

2.5. DESARROLLO DE DISPOSITIVOS

2.5.1. LITOGRAFÍA

Después de una breve descripción de las películas con las que se pretende estructurar en dispositivos, se debe tener en cuenta que para la elaboración de estos se tiene como desafío la reproducción de patrones de dimensiones inferiores a 50 μm [15]. Los procesos planos para los patrones de película delgada se basan en la definición del patrón de fotones o electrones en un polímero sensible (resistir) por la litografía y la transferencia de estas nanoestructuras en la película de manganita usando grabado en seco [3]. La litografía con UV convencional se utiliza tradicionalmente para obtener patrones más altos que una micra de tamaño, sin embargo motivos en dimensiones inferiores a 50 nm se necesita técnicas de alta resolución, como la electrónica de barrido del haz de litografía (SEBL), la litografía de rayos X (XRL) o nanoimpresión (NI). Durante SEBL (o XRL) la resolución de las diferentes técnicas de litografía se observan en la tabla 1. 1.

Tabla 1.1. Resolución de técnicas de litografía

TECNICA	RESOLUCION
Óptica	1 μm $\pm$ 0,3 μm
EBL	0,38 μm $\pm$ 0,05 μm
Rayos-X	0,25 μm $\pm$ 0,30 μm
IBE	0,20 μm
SPL	0,02 μm

Después de la nanolitografía, la transferencia del patrón se puede lograr utilizando el grabado directo con la resina como máscara, o utilizando un proceso de despegue metálico seguido por ataque químico. Hasta la fecha, en contraste con

los extensos estudios de grabado por iones reactivos (RIE) desarrollado para las películas de FM, el proceso de grabado de plasma para los materiales de manganita no se ha estudiado y la bibliografía es muy pobre. Esto es bastante sorprendente, ya que estos óxidos CMR son materiales muy prometedores para la realización de nanodispositivos espintrónica en un futuro cercano [16]. En la Figura 1.7 se observa una Microestructura de LSMO/STO desarrollada por proceso de litografía por UV usando un fotoresist positivo como primer aproximación al desarrollo de este trabajo de investigación.

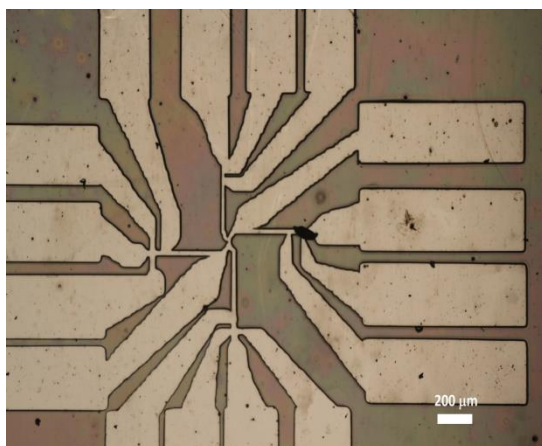


Figura 1. 7 Microestructura de LSMO/STO por proceso de microlitografía UV en la Universidad de los Andes.

2.6. DISPOSITIVOS

Por otra parte, estos materiales deben permitir verdaderas operaciones de encendido y apagado, que es apropiado para elementos sensores contrario a los dispositivos no volátiles, tales como memorias de acceso aleatorio magnética (MRAM) [17]. La respuesta MR a baja temperatura de un rectángulo $2,5 \times 12,5 \mu\text{m}^2$ LSMO/STO/LSMO se presenta en la figura 1.8. La diferencia en la resistencia entre las configuraciones antiparalelas y paralelas del momento en los electrodos LSMO produce un MR de 86% en 4.6K [3].

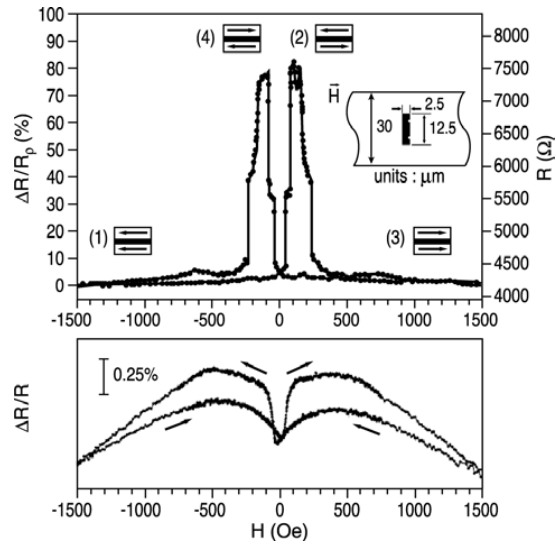


Figura 1. 8 La respuesta de MR a baja temperatura de un $2,5 \times 12,5 \mu\text{m}^2$ de LSMO / STO / LSMO y la LFM de una capa individual en LSMO para comparación [3].

Otros investigadores han desarrollado dispositivos mediante películas gruesas de $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ [18], preparadas por serigrafía sobre Al_2O_3 , optimizando el tamaño de grano con el fin de conservar con el tiempo una buena adherencia, mayor cantidad de límites de grano y por ende obtener mayor LFM. Demostrando que a temperatura ambiente la resistividad cambia hasta un 1,5% en campos de 1kOe. Siendo esta sensibilidad suficientemente alta para fabricar un detector de proximidad (potenciómetro circular).

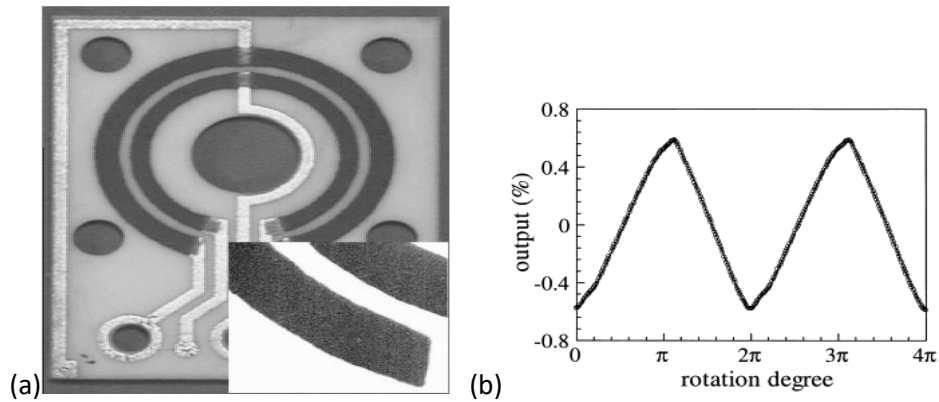


Figura 1. 9 (a) Película LSMO sobre sustrato de Al_2O_3 , con la configuración de puente de Wheatstone y (b) Señal de salida del potenciómetro durante la rotación de los imanes [18].

Un sensor tiene que ser diseñado para reducir al mínimo las derivas térmicas y para optimizar la respuesta MR. Para tal fin, es conveniente para operar el dispositivo con los cuatro brazos de un puente Wheatstone (Figura 1.9). Cuatro resistencias se modelaron, y los seis contactos en el puente están realizados por sinterizado con pintura de plata a $800\text{ }^\circ\text{C}$. En estas condiciones, cada brazo tiene una resistencia de aproximadamente 2 kW . El potenciómetro se completa con dos imanes medio-anillo, que gira cara a cara respecto al centro del sensor, con el anillo de sensor que está situado entre los dos imanes. Un imán de ferrita, que tiene el mismo tamaño que el sensor y 4 mm de espesor se ha usado para este propósito. En la Figura 10 se observa la respuesta del sensor debido a la rotación del imán. En la configuración utilizada del sensor, cuando el imán cubre la mitad de cada resistencia de la película, el puente es compensado y hay una salida de cero. Cuando el imán cubre sólo dos de ellos, el puente está en su desequilibrio máximo [18].

CAPITULO II

OBJETIVOS

1. OBJETIVO GENERAL

Estudiar la influencia de reducción de volumen de la manganita de lantano dopada con estroncio (LSMO), en las propiedades de transporte, eléctricas y magnéticas, buscando con esto optimizar parámetros para el desarrollo de dispositivos de control como los sensores magnéticos.

2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar los parámetros óptimos de crecimiento de las películas delgadas de LSMO/STO mediante la técnica de pulverización catódica.
- Caracterizar las películas delgadas y en forma de dispositivos estructuralmente mediante Difracción de Rayos X (DRX) y Reflectometría de Rayos x (XRR), morfológicamente mediante microscopia de fuerza atómica (AFM) y microscopia electrónica de barrido (SEM), eléctricamente con ayuda de un criostato y magnéticamente mediante el sistema de medidas de propiedades físicas (PPMS).
- Estudiar la respuesta magnetorresistiva de los dispositivos de LSMO/STO, y determinar si estos son aptos o no para aplicaciones de dispositivos de control como sensores magnéticos.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde hace unos cuantos años, la Nanotecnología está llamando la atención de muchos científicos, debido tanto a su alto potencial a nivel tecnológico, como a su utilidad para estudiar sistemas en los que los fenómenos cuánticos cobran importancia [19].

En el magnetismo, en gran medida, es un fenómeno a nanoescala. Esto refiere no solo a los materiales obtenidos de origen natural sino también a las nanoestructuras crecidas artificialmente. Estas últimas nos permiten una gran cantidad de geometrías, composiciones químicas y técnicas de obtención que van desde el material en bloque a nanoestructuras en película delgada [20].

Por esto, en las últimas décadas la inversión en tiempo y dinero destinada al estudio y a la fabricación de sistemas a escala cada vez más pequeña ha crecido de manera vertiginosa [21]. Debido a que los sistemas que poseen un número pequeño de átomos presentan propiedades físicas y químicas muy diferentes respecto al material en bloque. Por ejemplo se observan importantes cambios en la estructura electrónica, conductividad, reactividad, temperatura de fusión y propiedades mecánicas cuando el tamaño de las partículas se reduce por debajo de un tamaño crítico. Estas nuevas propiedades abren numerosos campos para la investigación y desarrollo de diversos dispositivos tecnológicos. Sin embargo, para poder utilizar un sistema dado en una aplicación concreta es fundamental conocer previamente la evolución de sus propiedades con el tamaño de las partículas que lo componen.

Entre las propiedades magnéticas, la magnetización de saturación M_s , por ejemplo, es independiente del tamaño de la muestra, por lo menos hasta que el número de átomos en la superficie llegue a ser significativo en comparación con el número total de átomos en el volumen de la muestra. Por otro lado, la coercitividad, H_c , muestra un efecto marcado tamaño [20]. Marcando así dos efectos: uno de reducción de tamaño y otro de superficie.

En el efecto de tamaño, crece la posibilidad de que un solo cristal puede convertirse en un único dominio cuando su tamaño se reduce por debajo de un valor crítico, L_c (de unos pocos cientos de Angstroms), obteniendo altos valores de coercitividad; y posteriormente tiende hacia cero. Por otro lado, en los sistemas nanométricos, las superficies pasan a jugar un papel más importante que el que tenían en los sistemas macroscópicos. Esto es así porque, al reducir la escala, el número de átomos que tenemos en la superficie con respecto al número de átomos que tenemos en volumen va a aumentar drásticamente. Por tanto, se hace necesario comprender bien las propiedades de las superficies y su efecto en las propiedades eléctricas y magnéticas, desde el material en bloque, película delgada, hasta la nanoestructura. Para así, poder determinar las mejores condiciones en el desarrollo de dispositivos de control a nanoescala.

La manganita de Lantano dopada con estroncio (LSMO) en su estequiometría $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ presenta un comportamiento ferromagnético a temperatura ambiente, con transición metal aislante a temperaturas por encima de 320 K, y un efecto de magnetorresistencia colosal. La pregunta que queremos responder es que efecto se genera sobre la magnetorresistencia en este material crecido en forma de película delgada con una orientación preferencial si cambiamos el campo magnético aplicado (magnitud y dirección) y el volumen del material a tamaños nanométricos y si este es un material con potencial aplicaciones en el desarrollo de dispositivos de control.

CAPITULO III

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

1. PREPARACIÓN DE LAS PELÍCULAS DELGADAS

Las películas de $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ fueron sintetizadas por la técnica de deposición física de vapor (PVD), específicamente por pulverización catódica, también conocida por su nombre en inglés “sputtering”.

En la figura 3.1, se observa el esquema del sistema de pulverización catódica asistido por DC en donde se depositaron las muestras, el cual consiste principalmente en un proceso de bombardeo iónico, en donde el blanco en forma de disco está hecho del material que deseamos depositar $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ (LSMO), donde inicialmente se debe preparar mediante reacción de estado sólido con los polvos de alta pureza de La_2O_3 , SrCO_3 y Mn_2O_3 .

Este blanco que es el cátodo está conectado a una fuente de voltaje la cual es capaz de suministrar algunos kilovoltios para el caso DC. El sustrato (SrTiO_3 (STO), en nuestro caso) está frente al blanco y dependiendo del tipo de muestra a crecer, este debe ser calentado a una temperatura específica ($T=830^\circ\text{C}$). El plasma está formado por gases de proceso, en nuestro caso oxígeno (O_2) de ultra alta pureza (99.9992 %), ionizado por el fuerte campo eléctrico.

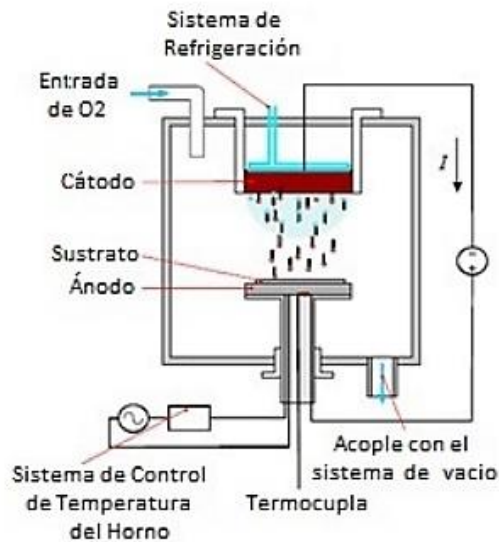


Figura 3. 1 Sistema de deposición por sputtering DC.

El alto voltaje entre el cátodo y el ánodo provoca que los iones del gas de proceso golpeen el blanco con la energía suficiente para arrancar átomos de la superficie del blanco mediante un proceso de transferencia de momento. Cuando el ion golpea la superficie del material, transfiere parte de su energía a los átomos que lo forman, produciendo una colisión en cascada. Las múltiples colisiones hacen posible que algunos átomos del material adquieran la suficiente energía para abandonar la superficie, alcanzar el sustrato y adherirse a él. La mayor parte de la energía proporcionada por los iones incidentes se transforma en calor, siendo este disipado mediante un circuito de refrigeración que evita el sobrecalentamiento del cátodo, esto se realiza a cierta presión de trabajo, para nuestro caso es del orden de 10^0 mBar. El equipo se encuentra en el Laboratorio de Películas Delgadas de la Universidad del Valle.

2. CARACTERIZACIÓN

2.1. CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL

Como método de caracterización estructural se realizó difracción de rayos x (DRX) al material en bloque, es decir al blanco obtenido por sinterización. Además, la estructura cristalina de las películas delgadas está fuertemente relacionada con los parámetros de crecimiento. A su vez, muchas de las propiedades eléctricas, electrónicas y magnéticas dependen de esta. Por esta razón, cualquier película delgada debe caracterizarse estructuralmente por difracción de rayos X, (X ray diffraction, XRD de sus siglas en inglés). Las medidas se realizaron en un difractómetro de rayos X de la marca Xpert-Pro de la compañía Panalitical en configuración Bragg Bentano y la indexación de los picos se realizó con la ayuda de una amplia base de datos que posee el difractómetro; éste opera a 40 kV y 80 mA con un ánodo de cobre (Cu), utiliza un monocromador híbrido para suprimir la radiación $K_{\alpha 1}$ y $K_{\alpha 2}$ con una radiación incidente con longitud de onda $\lambda=1.54056 \text{ \AA}$. El cual se encuentra disponible en la Universidad del Valle, ver Figura 3.2.

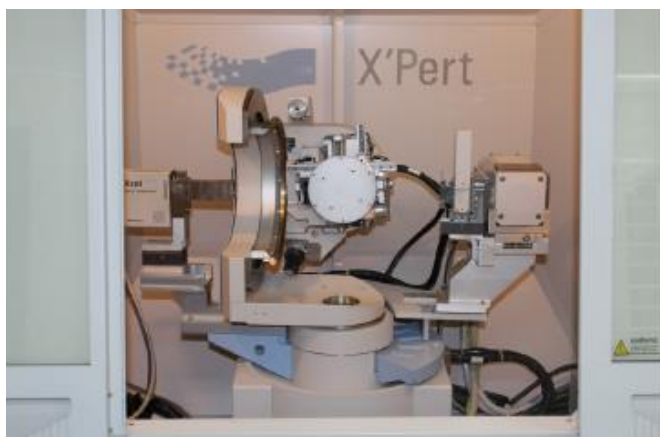


Figura 3. 2 Fotografía del equipo de rayos X de la marca X'pert Pro de Panalitical que se encuentra en la Universidad del Valle

Adicionalmente se realizó reflexión de rayos x (XRR) a bajo ángulo θ - 2θ , para determinar el espesor de las películas; este ángulo crítico se determina a partir del cual se pueden identificar los picos asociados a la interferencia entre la superficie de la película y la interfaz sustrato-película. Debido al tamaño finito de los picos y al incluir el índice de refracción de la película es necesario usar la ley modificada de Bragg.

$$d = \frac{\lambda}{2 B (1/2)} \quad 3.1$$

Luego de encontrar la posición de los picos asociados a la interferencia se hace un ajuste lineal en una grafica $\sin^2\theta$ en función de $(n + k)^2$, donde $k=0$ para los mínimos de intensidad y $k=1/2$ si es un máximo de intensidad, $n=1, 2, 3, 4$ es un entero. Del ajuste se encuentra una pendiente B para la capa que se esté analizando. Utilizando la forma modificada de la ley de Bragg con $\lambda=1,54056\text{\AA}$ es posible determinar el espesor y en consecuencia, la tasa de crecimiento de las películas delgadas.

2.2. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA

La rugosidad de superficie del LSMO se analizó mediante microscopía de fuerza atómica (AFM). Este tipo de técnica de caracterización es ampliamente utilizada para estudiar la morfología de las superficies de materiales en forma de película delgada. Las medidas de morfología de las muestras se realizaron en un microscopio de fuerza atómica MFP-3D Asylum Research (Atomic force microscopy, AFM de sus siglas en inglés); ver Figura 3.3, controlado mediante el software, SPIP. El equipo se encuentra disponible en el Centro de Excelencia en Nuevos Materiales (CENM) ubicado en la Universidad del Valle. Todas nuestras medidas de AFM fueron tomadas a temperatura y presión ambiente, en el modo no contacto para barridos de 0.5, 1, 3, 5 y 8 μm .

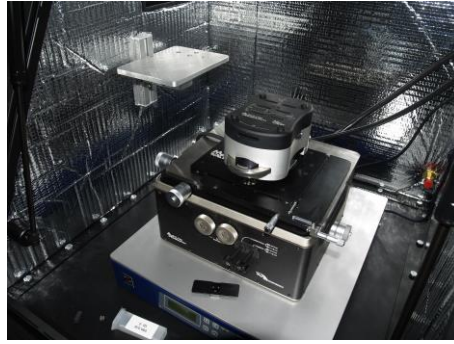


Figura 3. 3 Fotografía del Microscopio de Fuerza Atómica MFP-3D Asylum Research disponible en el CENM.

Mediante el uso de esta técnica se han desarrollado estudios estadísticos [22], tanto para la determinación de tamaño de grano como para determinar la rugosidad de superficie, dado que estas técnicas proporcionan información de los procesos de crecimiento que se pueden correlacionar con las propiedades de la película. Para toda película que crece estocásticamente, cada punto de su superficie en el plano (x,y) tiene un espesor definido por la función $h(x,y)$. Esta función debe ser unívoca. Si elegimos un nivel “cero” como el valor del promedio espacial de la función h sobre todos los puntos (x,y) se define la función altura $z(x,y)$ como :

$$z(x,y) = h(x,y) - \langle h(x,y) \rangle_x \quad 3.2$$

De esta forma nuestra función $z(x,y)$, oscila alrededor del valor promedio de h . La figura 3.5 muestra esquemáticamente estas magnitudes para un sistema unidimensional.

La rugosidad es la desviación cuadrática media de la función altura:

$$z(x,y): \sigma = \sqrt{\langle z^2(x,y) \rangle} \quad 3.3$$

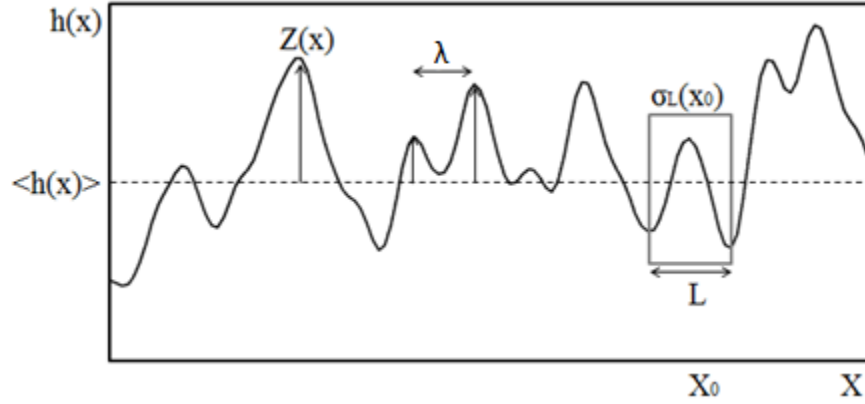


Figura 3. 4 Diagrama del perfil de superficies. Se identifica el tamaño de ventana L, rugosidad local $\sigma_L(x_0)$, y longitud de correlación λ .

Para el cálculo del exponente de rugosidad, longitud de correlación y rugosidad local, dado que se desconoce el proceso dinámico del sistema en el crecimiento, es necesario desarrollar un método que nos permita obtener estas magnitudes o parámetros de la rugosidad conociendo la información de una superficie en su estado final de crecimiento, en nuestro caso una imagen de microscopia de fuerza atómica AFM. El procedimiento más ampliamente utilizado es el de analizar el perfil de la superficie incrementando su tamaño de observación [22]. En el caso de imágenes de AFM, donde esta variación de tamaño es limitada, es útil estudiar el escalamiento de la rugosidad local con un ancho de ventana de tamaño L, $\sigma_L(x, y)$, definido como:

$$\sigma_L(x_0, y_0) = [\langle [z(x, y) - \langle z(x, y) \rangle_L]^2 \rangle_L]^{1/2} \quad 3.4$$

Donde $\langle z(x, y) \rangle_L$ se realiza para todas las alturas dentro de la ventana L. La rugosidad dependiente de tamaño $\sigma(L, t)$ se obtiene del promedio espacial de la rugosidad local $\sigma_L(x_0, y_0, t)$ sobre todo el dominio de puntos disponibles de acuerdo con el tamaño L de la imagen de AFM, según la expresión:

$$\sigma(L, t) = \langle \sigma_L(x_0, y_0, t) \rangle_{x,y} \quad 3.5$$

$\sigma(L, t)$ tiene un comportamiento característico en dos regiones de su dominio:

$$(\sigma(L, t) \propto L^\alpha) \quad [L \ll \lambda] \quad 3.6$$

$$\sigma(L, t) = \sigma_{sat}(L, t) = cte \quad [L \gg \lambda] \quad 3.7$$

Para resolver el interrogante de porque el sistema se satura, o como el sistema sabe cuándo saturarse, se define la longitud de correlación (λ), que tanto “sabe” un punto de crecimiento de sus vecinos. Esta correlación es dependiente del tiempo, y es de esperar que las partículas depositadas estén cada vez más cerca unas de las otras a medida que el tiempo de deposición aumenta.

Con el fin de obtener una evaluación cuantitativa de la morfología se tomaron imágenes de diferentes tamaños de ventana y se utilizó el método estadístico descrito, el cual permite obtener de una superficie dada parámetros que nos dicen el tipo de crecimiento, tales como la rugosidad de saturación, la longitud de correlación y el exponente de rugosidad. Las imágenes bidimensionales tomadas corresponden a una matriz de datos que nos da los valores de altura (eje z) para todo punto (o el equivalente a un pixel) de la superficie en un rango de escalas físicas en el eje x y y . En nuestro caso se trabajó con matrices de 512, lo cual implica tener una resolución de ese mismo número pero en pixeles. La equivalencia de un pixel en escalas físicas varía de acuerdo al tamaño de la imagen. Por ejemplo, para el caso de $L=5\mu m$ tenemos que $1pix = \frac{5}{512} = 0.0097\mu m$.

El algoritmo desarrollado para la evaluación estadística de la rugosidad local y rugosidad dependiente del tamaño permite hacer iteraciones variando el tamaño de la ventana e ir calculando los distintos valores de la rugosidad para diferentes alturas dentro del tamaño de la ventana L y finalmente promediarlo sobre todos los anchos de ventana para obtener la rugosidad promedio.

2.3. CARACTERIZACIÓN PROPIEDADES ELÉCTRICAS

El estudio de las propiedades eléctricas en función de la temperatura y el campo magnético para determinar la transición metal aislante de la manganita se hizo uso del PPMS Quantum Design (Physical Property Measurement System) equipo ubicado en el centro de estudios de nuevos materiales (CENM), este ensayo se realizó mediante la técnica de las cuatro puntas [23], como se observa en la figura 3.5.

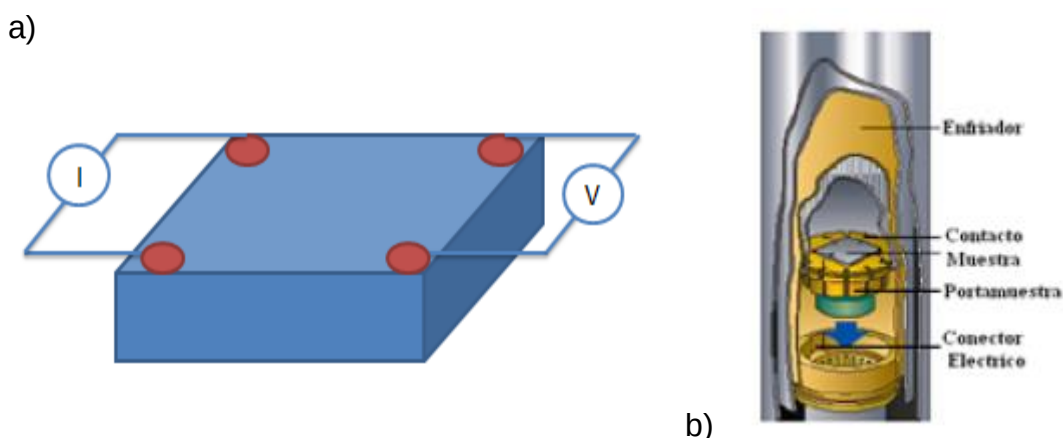


Figura 3. 5 (a) Configuración de contactos para medida de resistividad para sustratos cuadrados. (b) puck o portamuestras de contacto del sistema PPMS Quantum Design.

2.4. CARACTERIZACIÓN PROPIEDADES MAGNÉTICAS

Una de las caracterizaciones más importantes, observar el comportamiento de las muestras bajo un campo magnético aplicado. Para las medidas magnéticas se utilizó un sistema para medir propiedades Físicas, (Physical Properties Measurement System, PPMS de sus siglas en inglés) ubicado en el Centro de Excelencia en Nuevos Materiales-CENM de la Universidad del Valle, este permite trabajar en el modo de magnetómetro de muestra vibrante (Vibrating sample magnetometer, VSM de sus siglas en inglés), en el cual, se puede tomar medias

magnéticas de las muestras en función de distintas variables. En la figura 3.6, (a) se observa una imagen del PPMS, mientras que en (b) se aprecia un esquema del VSM el cual consta principalmente de un motor lineal encargado de hacer vibrar la muestra, un conjunto de bobinas de detección y la electrónica necesaria para el control del sistema, además de tener el MultiVu software con el cual se automatiza el sistema.

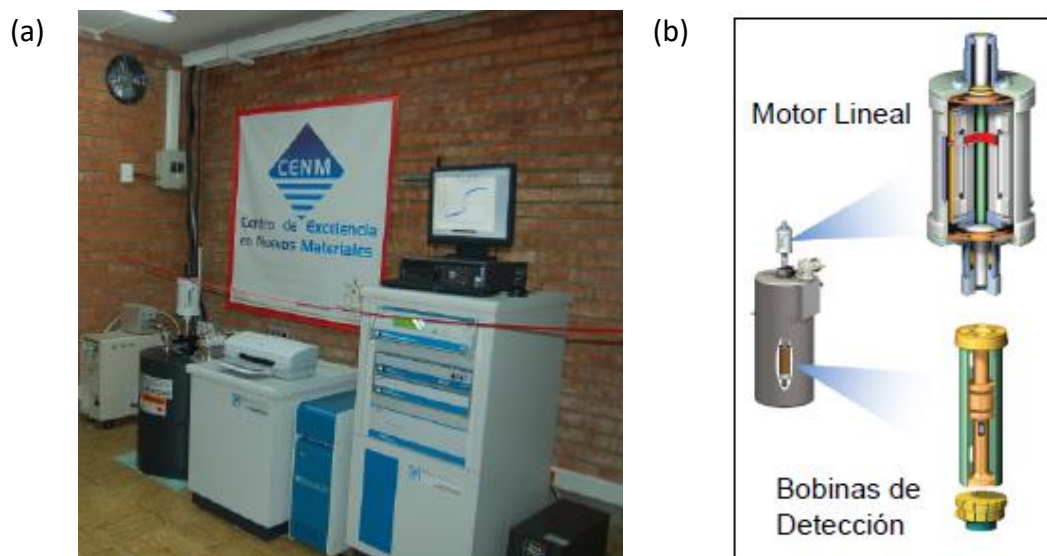


Figura 3. 6 (a) Imagen del PPMS de la marca Quantum DesignTM, ubicado en el Centro de Excelencia en Nuevos Materiales – UNIVALLE. (b) Montaje del Magnetómetro de muestra vibrante, se observa el motor lineal y el conjunto de bobinas de detección.

Las propiedades magnéticas del compuesto LSMO depositada sobre sustratos de STO fueron investigadas como función de la temperatura y del campo magnético aplicado. Es necesario tener en cuenta que todos los datos de magnetización, el campo magnético ha sido aplicado paralelo al plano de la película.

3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Como metodología estadística se realiza un modelo lineal generalizado donde el propósito de esta investigación es evaluar la influencia de la variable del ancho y largo de camino o hilos obteniendo relaciones (ancho/largo) de 0.0333, 0.0667, 0.0833 y 0.1667 en la manganita de lantano dopada con estroncio (LSMO) en película delgada (Figura 3.1), con el fin de maximizar o minimizar algunas propiedades más relevantes en el material, puesto que la demanda de miniaturización de dispositivos va aumentando, exigiendo no solo la reducción de tamaño si no también nuevas funcionalidades en el dispositivo [24] [25], por eso se variará el área de estudio realizado por el método de litografía óptica en conjunto con un método de etching o grabado físico (sputtering). La geometría de la estructura se diseña con el fin de realizar medidas a cuatro puntas, en donde se aplica corriente por los extremos y se mide el voltaje en el medio (Figura 3.7).

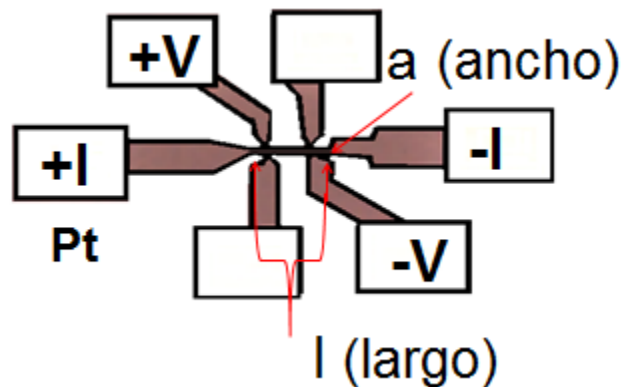


Figura 3. 7 Esquema litografía para medición por método de cuatro puntas

Por tanto, las variables independientes elegidas, relacionadas con parámetros de crecimiento por la técnica de pulverización catódica, fueron: temperatura del sustrato (830°C), presión de trabajo del orden de 2,7 mBar; una corriente entre cátodo y ánodo en la descarga de 130 mA; distancia entre electrodos (cátodo y ánodo) de 2,5 cm. La variable dependiente o de respuesta (relación ancho/largo de camino) será en base para el estudio de las propiedades eléctricas y determinación de la temperatura de transición metal aislante del material oxidado en película delgada que es resistividad en función de temperatura; para el estudio de las propiedades de magnetorresistencia las variables son la resistividad como función de la temperatura a diferentes campos magnéticos e isothermas de resistencia en función del campo magnético.

4. PREPARACIÓN DEL DISPOSITIVO

Para estructurar dispositivos, se debe tener en cuenta que para la elaboración de estos se tiene como desafío la reproducción de patrones de dimensiones inferiores. La fabricación de la muestra consistió en crear un canal bien definido para realizar medidas de resistencia a cuatro puntas. El proceso de fabricación se realizó en un cuarto limpio de la escuela de física de la materia condensada de la Universidad de Geneva en Suiza. Los pasos principales de fabricación están ilustrados en la figura 3.8.

Estos pasos consisten en un recubrimiento por centrifugación de un fotoresist positivo o negativo, en este caso se trabajó exactamente con Microposit S1813 G2 fotoresist positivo exponiéndolo a una luz UV a través de una máscara que tiene un patrón de diseño y luego es inmersa en un revelador, para esta investigación se hizo uso de Microposit 351 developer (relación 1:4). Si es necesario, se usa un ataque iónico de Ar para hacer un grabado ya sea en la película o hasta en el sustrato.

Los contactos eléctricos son realizados depositando 50nm de metal. Las curvas de corriente en función del voltaje características de los diferentes metales (Au, Pd, Pt, Cu, Ti, Ag y Cr) fueron estudiadas y muestran un comportamiento óhmico idéntico. Para nuestras medidas, se prefirió trabajar con Pt debido a su resistencia a la oxidación. Finalmente el fotoresist puede ser removido usando acetona, pero usualmente se mantiene como una capa protectora. Las medidas eléctricas son generalmente desarrolladas a cuatro puntas en orden de eliminar las resistencias de contacto.

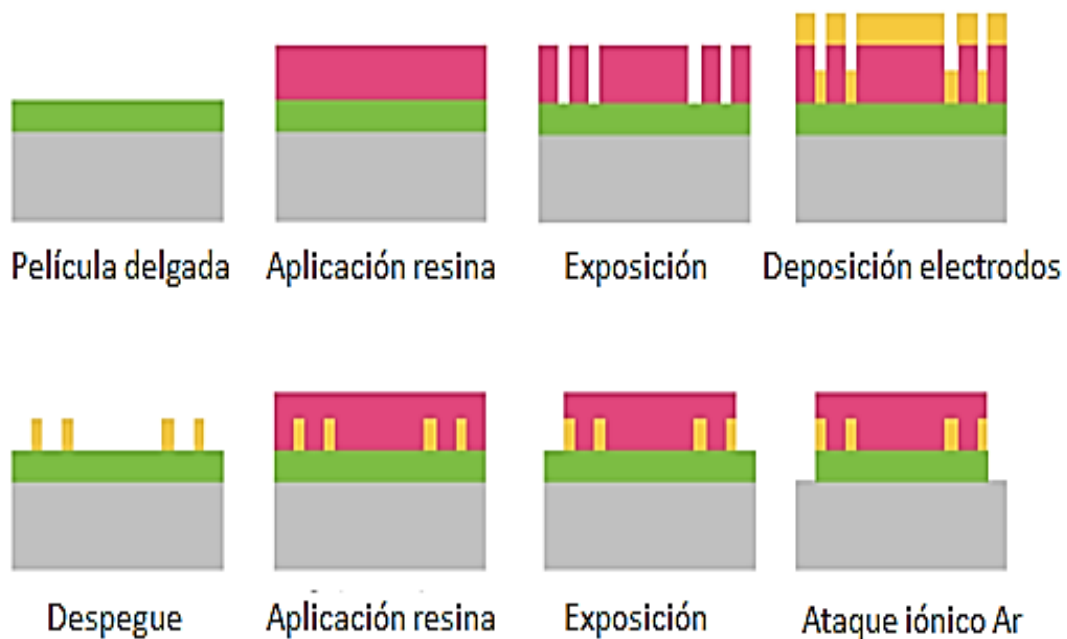


Figura 3. 8 Proceso de elaboración de dispositivo en cuarto limpio de la Escuela de Física de la Universidad de Geneva.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta investigación, se depositaron películas delgadas de LSMO por sputtering DC en una atmosfera de oxígeno puro sobre sustratos de SrTiO_3 (001) a una temperatura de 830 °C. Mediante el análisis de difracción de rayos-X (XRD), se encontraron los picos de Bragg para la película donde solamente los picos (002) fueron observados indicando un crecimiento texturado. Se caracterizó morfológicamente las muestras mediante microscopia de fuerza atómica (AFM). La dependencia de la resistividad con la temperatura muestra un comportamiento típico de sistemas FM con transición M-I ~300K. Se llevaron a cabo isothermas de resistencia y magnetización en función del campo magnético aplicado para caracterizar las muestras. Los hilos de LSMO fueron grabados usando la técnica de fotolitografía en conjunto de un método de etching o grabado físico y contactados con alambres de cobre usados para conectar las hilos al porta muestras. Las propiedades eléctricas fueron contrastadas con los resultados de la película delgada. Se estudió la dependencia de las propiedades de transporte con el espesor de la película de 25 nm y la variable dependiente de este experimento que es la relación ancho/largo de los hilos para potencial aplicación como sensores magnéticos.

1. CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL

Primeramente se realizó una identificación de las fases presentes en el material en forma de bloque del LSMO, que servirá como fuente de producción para las películas delgadas. Posteriormente se realizaron medidas de rayos X (DRX) para la verificación de las fases presentes en el material de forma de película delgada y reflectividad (XRR) poder obtener el espesor de esta.

1.1. CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL BLOQUE

Para la muestra en bloque (blanco sinterizado) se realizó una medida difracción de rayos x (DRX) con una configuración Bragg Bentano (θ - 2θ) entre 20° y 80° , y posteriormente se realizó un refinamiento Rietveld. En la figura 4.1 se observa el difractograma del LSMO en su fase ferromagnética (FM), en la cual no se observa ningún tipo de fase sin identificar lo que permite afirmar que el crecimiento corresponde únicamente a la composición y fase del $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$. El refinamiento se logró realizar en base a la carta 00-040-1100 de $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ utilizando el programa GSAS, obteniendo un χ^2 de 0.017 y un indicador de bondad de 0,08 (los parámetros de este refinamiento se encuentran reportados en la tabla 4.1). En base a los picos presentes en este espectro, se pudo determinar un parámetro de red de $3.866\text{\AA}$ fuera del plano.

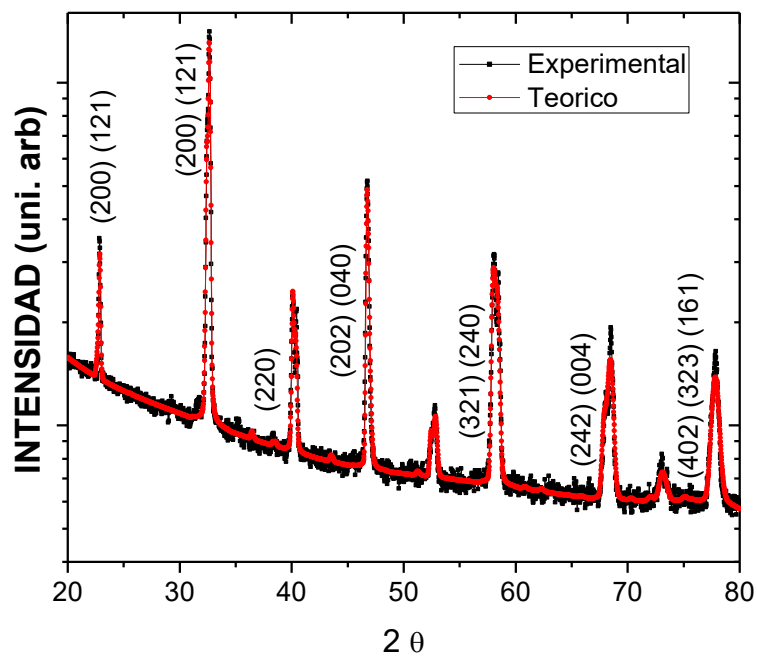


Figura 4. 1 Patrón de difracción de rayos X para la muestra en bloque, en donde el espectro negro corresponde al obtenido experimentalmente y el espectro rojo al calculado teóricamente mediante refinamiento Rietveld.

Tabla 4. 1 Parámetros refinamiento Rietveld

λ_{Cu} (Å)	1.5406
Rango 2θ	20-80
Grupo espacial	P 1 2/c 1
a (Å)	5.51
b (Å)	7.73
c (Å)	5.47
Volumen (Å ³)	233.462
Densidad (g/cm ³)	6,399
$\alpha=\beta=\gamma$ (°)	90

1.2. CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL EN PELÍCULA DELGADA

Una vez depositadas las películas delgadas, se realizaron las medidas de XRD. En la fig. 4.2, se observa el difractograma realizado en la configuración $\theta - 2\theta$ ó Bragg Bentano a alto ángulo para barridos entre 20 y 80 grados. Es posible identificar los picos (001), (002) y (003) STO del sustrato y se observa claramente un crecimiento preferencial del LSMO alrededor de la reflexión 00/ del sustrato. Se observa que la capa está libre de impurezas y no hay evidencia de fases adicionales, por ende, es posible afirmar que la capa crece de manera texturada en la dirección 00/ perpendicular a la superficie del sustrato. La forma más directa para determinar el estrés en las muestras se puede realizar a través del cálculo de la constante de red fuera del plano. A partir de la ley de Bragg y leyendo las reflexiones de los picos 00/ del sustrato, calculamos el parámetro de red en c perpendicular a la superficie del sustrato, obteniendo un parámetro de red de $3,850 \text{ \AA} \pm 0,001\text{\AA}$, y un porcentaje de desacople de 1,4% entre el sustrato y la película delgada y con respecto al bloque de 0,4%.

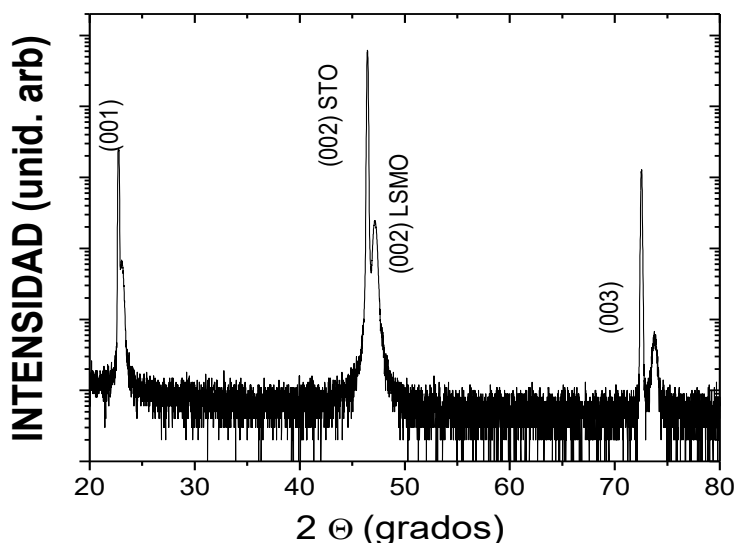


Figura 4. 2 Patrón de difracción de la capa de LSMO. Debido a la similitud entre los parámetros de red, las muestras presentan un crecimiento texturado sobre el sustrato.

Posteriormente, se realizó un ensayo de reflectividad de rayos x (XRR) o difracción a bajo ángulo θ - 2θ entre 0° y 2° para encontrar el espesor de la película crecida durante 3 horas y además nos permitirá calcular la tasa de deposición. En la figura 4.3 es posible observar claramente las oscilaciones Kiessing, a partir de las cuales podemos extraer el espesor de la capa. Debido al tamaño finito de los picos y al incluir el índice de refracción de la película es necesario usar la ley modificada de Bragg (ecuación 2.1).

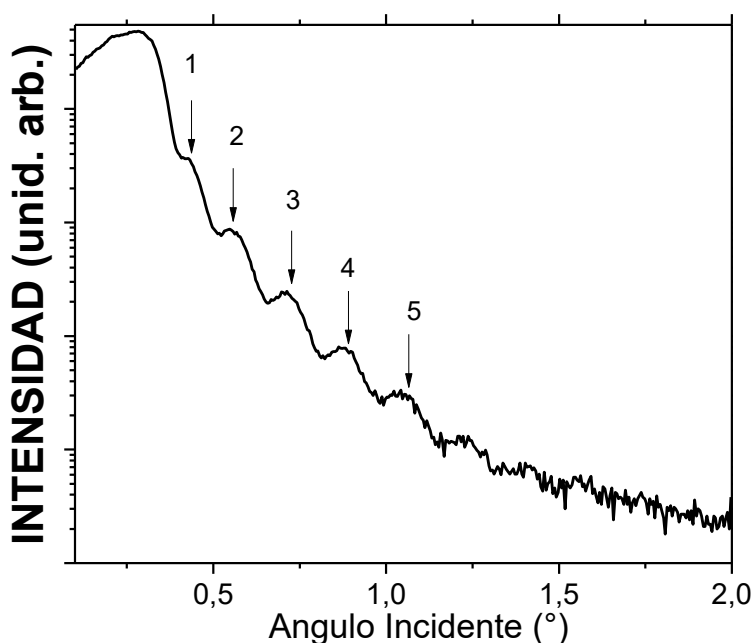


Figura 4. 3 Reflectividad de difracción de rayos x

Luego de encontrar la posición de los picos asociados a la interferencia como se observa en la figura 4.3, se hace un ajuste lineal en una grafica $\sin^2\theta$ en función de $(n + k)^2$ (figura 4.4), donde $k=0$ para los mínimos de intensidad y $k=1/2$ si es un máximo de intensidad, con $n= 1, 2, 3, 4$ y 5 es un entero. Del ajuste se encuentra una pendiente $B=9,963 \times 10^{-6}$. Utilizando la ecuación 3.1 para $\lambda=1,5406 \text{ \AA}$, se encontró un espesor de $d=25 \pm 1 \text{ nm}$. En consecuencia, la tasa de crecimiento de

la película en el sistema de pulverización catódica con las condiciones de potencia y presión trabajadas es de 8nm/h.

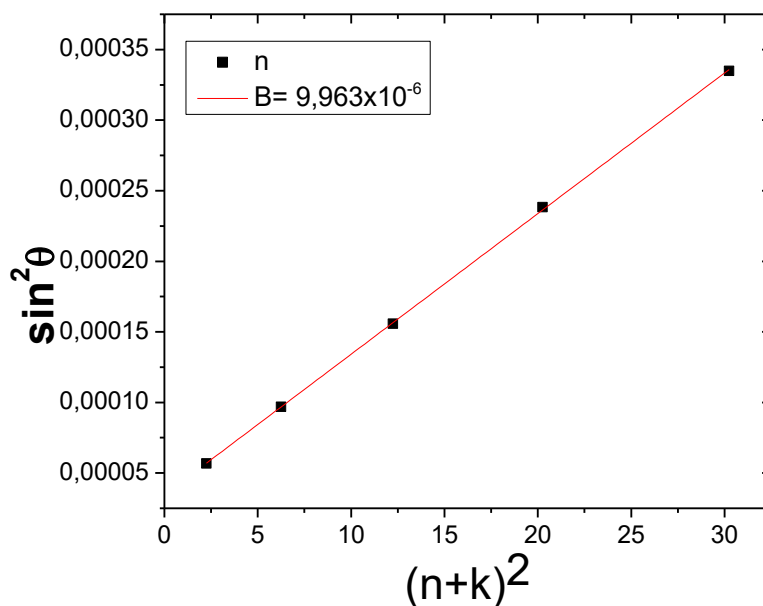
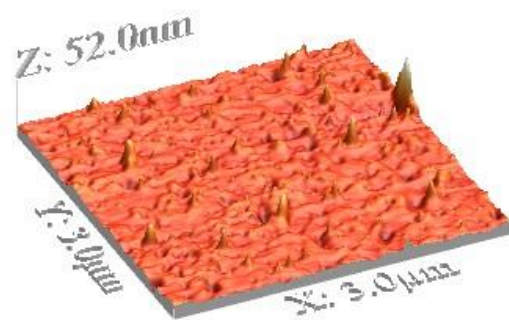
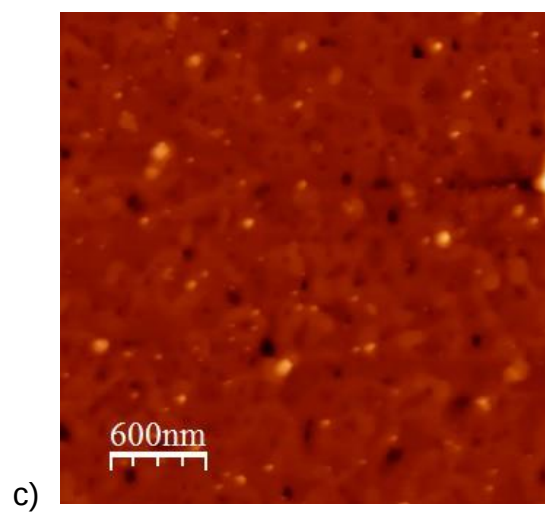
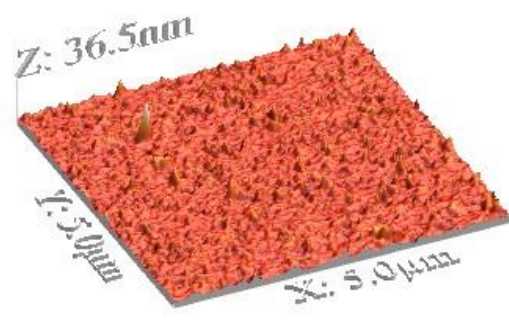
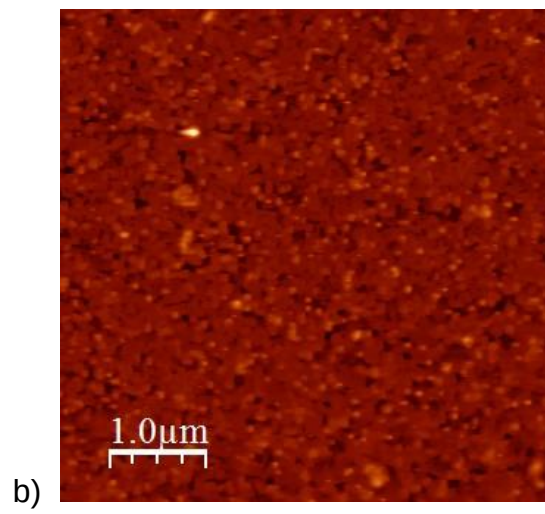
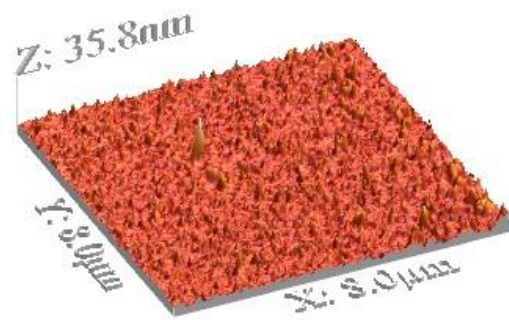
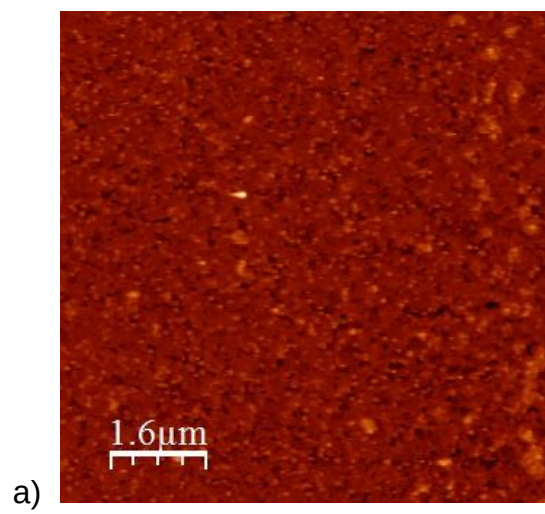


Figura 4. 4 Ajuste lineal en una gráfica $\text{Sen}^2\theta$ en función de $(n+k)^2$.

2. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA

Estudios han revelado que la rugosidad de superficie cumple un papel importante sobre los efectos en las propiedades eléctricas y magnéticas, por esta razón se realiza un análisis mediante microscopia de fuerza atómica (AFM) a la película de LSMO/STO. La figura 4.5 se muestra imágenes en 2D y 3D de $8 \times 8 \mu\text{m}^2$, $5 \times 5 \mu\text{m}^2$, $3 \times 3 \mu\text{m}^2$, $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ y $0.5 \times 0.5 \mu\text{m}^2$ tamaños de ventana.



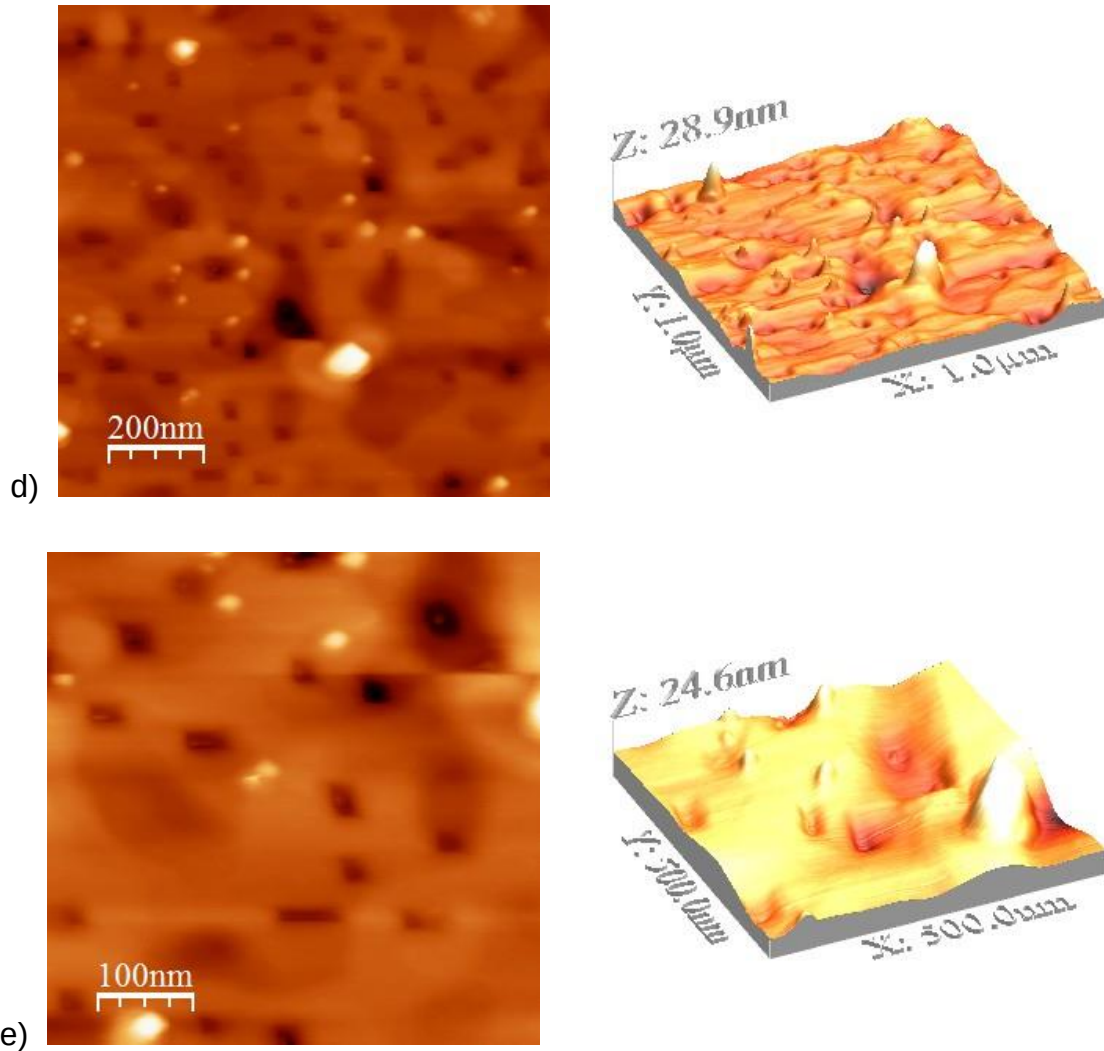


Figura 4. 5 Imágenes de AFM 2D y 3D de la película LSMO/STO para diferentes tamaños de ventana: a) 8x8μm b) 5x5μm c) 3x3μm d) 1x1μm y e) 500x500nm.

Se observan granos bien definidos y una superficie homogénea en la capa de LSMO, basados en la literatura esta capa presenta mecanismos de crecimiento capa a capa, el cual sigue la estructura de terrazas y escalones del sustrato. El átomo que llega a la superficie del sustrato se coloca en el medio del escalón y, a partir de ahí, va creciendo la estructura en forma 2D hasta la completa coalescencia entre los diferentes niveles de capa. Los átomos depositados sobre el sustrato están más fuertemente adheridos a la siguiente capa y así sucesivamente.

Con el fin de obtener una evaluación cuantitativa de la morfología superficial se tomaron imágenes con diferente área de barrido y se utilizó el método estadístico de acuerdo a lo discutido en la sección, el cual permite obtener de una superficie dada parámetros que nos definen: la rugosidad de saturación, la longitud de correlación y el exponente de rugosidad el cual nos permite deducir el tipo de crecimiento. Cuantitativamente, la figura 4.6 muestra el comportamiento de la rugosidad dependiente de tamaño $\sigma(L, t)$ con el tamaño de ventana L hecho a las respectivas imágenes bidimensionales de la película, para diferentes valores de L . Para todas las imágenes $\sigma(L, t)$ incrementa proporcionalmente a una ley de potencia ($\sigma(L, t) \propto L^\alpha$) y luego satura. Para resolver el interrogante de porque el sistema satura, o como sabe cuándo saturarse, se define la longitud de correlación λ , que tanto “sabe” un punto del crecimiento de sus vecinos. Es de esperar que las partículas depositadas estén cada vez más cerca unas de las otras a medida que el tiempo de deposición aumenta.

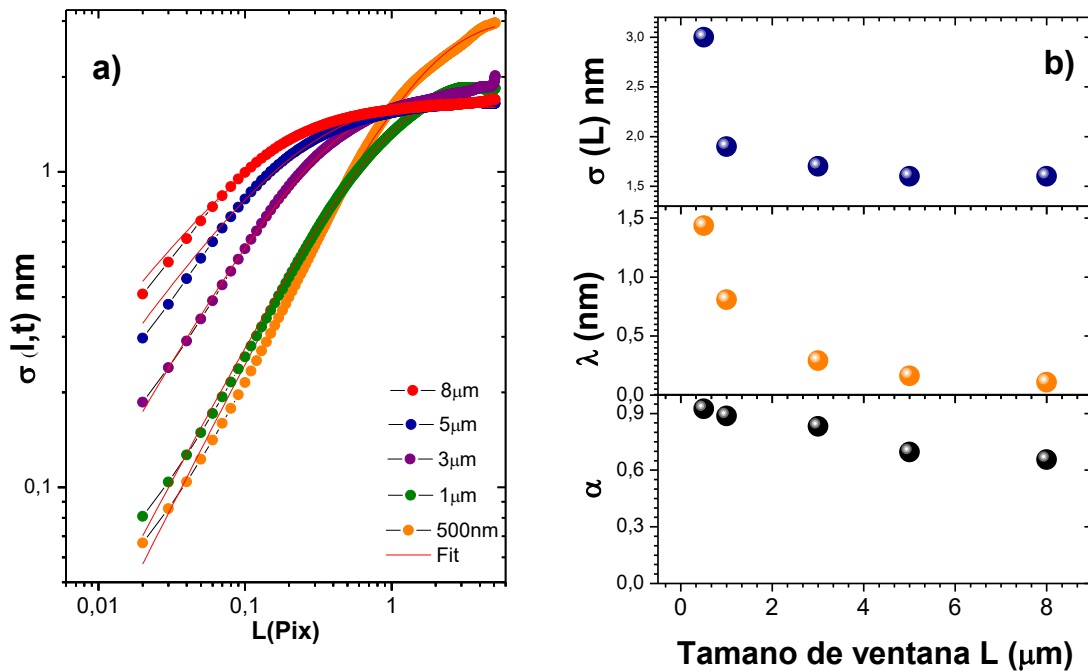


Figura 4. 6 a) Rugosidad en función del tamaño de ventana L , para los diferentes tamaños de imágenes D . b) Parámetros obtenidos del ajuste en función del tamaño de ventana L .

En líneas continuas rojas de la figura 4.6 corresponde al ajuste de los datos experimentales de la película LSMO/STO de acuerdo a la ecuación:

$$\sigma(L, t) = \sigma_{sat} [1 - \exp(-(L/\lambda)^\alpha)]^{1/2} \quad 4.1$$

Donde $\sigma_{sat}(L, t)$ es la rugosidad de saturación promedio, λ es la longitud de correlación y el exponente α relaciona el tipo de crecimiento, por ejemplo cuando $\alpha < 0.5$ el crecimiento es aleatorio o por el contrario es texturado cuando el valor oscila entre $0.5 < \alpha < 1$, finalmente cuando $\alpha = 1$ es epitaxial. Los valores extraídos del ajuste y su dependencia con el tamaño de la imagen son mostrados en la figura 4.6 (b).

Estos resultados indican que nuestra técnica utilizada para el estudio cuantitativo estadístico de la rugosidad obedece el comportamiento asintótico esperado teóricamente. Se puede observar que en la capa de LSMO el valor de la rugosidad de saturación σ_{sat} es una magnitud dependiente de la escala de medida, así como la longitud de correlación λ , estos valores tienden a aumentar a medida que la escala de observación se hace más pequeña; es decir la distancia entre las alturas es más pronunciada para tamaños de imágenes menores, mientras que el exponente de rugosidad α permanece casi constante, estos valores se encuentran oscilando entre $0.5 < \alpha < 1$, lo cual hace referencia a un crecimiento texturado corroborando los resultados obtenidos por difracción de rayos x. Los valores obtenidos después de realizar el ajuste se observan en la tabla 4.2.

Tabla 4. 2 Parámetros obtenidos del ajuste para diferentes tamaños de imagen L.

L (μm)	8	5	3	1	0.5
$\sigma_{sat}(\text{nm})$	1.60±0.05	1.65±0.05	1.70±0.05	1,90±0,05	3.00±0.05
λ (nm)	0.108±0.002	0.163±0.002	0.291±0.007	0,808±0,003	1,434±0.004
α	0.65±0.001	0.69±0.01	0.83±0.02	0.886±0.004	0.925±0.004
1 Pixel	0.0156	0.0097	0.0058	0.0019	0.00097

3. CARACTERIZACIÓN MAGNÉTICA

Las propiedades magnéticas del compuesto LSMO depositada sobre sustratos de STO fueron investigadas como función de la temperatura y del campo magnético aplicado. Es necesario tener en cuenta que todos los datos de magnetización que se mostrarán a continuación, el campo magnético ha sido aplicado paralelo al plano de la película.

3.1. CURVA DE DESMAGNETIZACIÓN TÉRMICA

En la figura 4.7, se muestra la curva de desmagnetización térmica, tomada para una película de LSMO/STO. La magnetización M (emu/cm^3) es calculada utilizando el volumen nominal de la fase ferromagnética, considerando el área de la superficie del sustrato y el espesor nominal, los datos fueron tomados en un rango de 10 a 400K, las curvas se tomaron sin aplicar campos de enfriamiento (ZFC, $H_{FC}=0$ Oe) y con campo de enfriamiento de 1000 Oe (FC, $H_{FC}=1000$ Oe). Estas curvas M (T) en ZFC y FC presentan características diferentes, si observamos se superponen sufriendo una bifurcación, la cual corresponde una temperatura de ~ 200 K, conocida como temperatura de *blocking* (T_B), por encima de esta temperatura, el momento magnético ya no se alinea con el campo, lo cual resulta en una disminución neta de la magnetización a medida que la temperatura aumenta con respecto a este punto. Con respecto a la magnetización para ambas medidas tiende a ser mayor a bajas temperaturas (10K) y aun mayor cuando hay un campo de enfriamiento aplicado (FC). Adicionalmente, con respecto a la temperatura crítica T_c , donde se muestra una transición del estado PM a altas temperaturas a un comportamiento FM por debajo de la T_c no se presenta cambios significativos para condiciones ZFC y FC.

Si observamos la curva para ZFC, a bajas temperaturas, cuando el campo de medida es aplicado el momento magnético intenta alinearse en la dirección del campo, a medida que la temperatura comienza a incrementar el momento magnético se orienta gradualmente a lo largo del campo, aumentando la magnetización hasta una temperatura $\sim 150\text{K}$, por encima de esta temperatura la magnetización comienza a disminuir. Es decir la energía térmica predomina por encima de la energía de orientación causando una disminución en la magnetización. La curva en ZFC presenta un pico ancho o *Plateau* en el cual la magnetización es casi constante, el rango de temperatura alrededor del cual ocurre esta entre 50 y 150K. Por encima de esta temperatura, el momento magnético ya no se alinea con el campo, lo cual resulta en una disminución neta de la magnetización a medida que la temperatura aumenta con respecto a este punto. Sin embargo, cuando la muestra es enfriada en presencia de campo magnético el comportamiento comienza a ser diferente y en caso de que los espines presenten otras interacciones será posible apreciarlas. La curva en FC alcanza la magnetización de saturación. A Partir de esta, es posible observar un incremento alrededor de 150 emu/cm^3 (valor tomado a 10K).

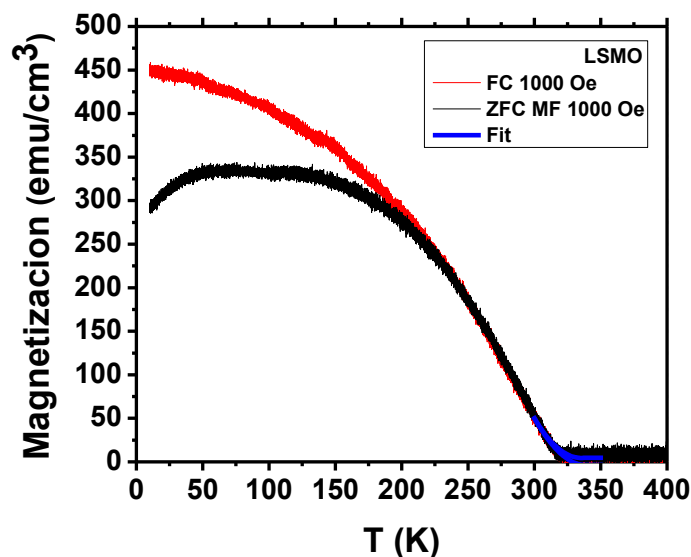


Figura 4. 7 Dependencia de la magnetización como función de la temperatura en un rango de 10 a 400 K bajo condiciones de ZFC ($H_{FC}=0 \text{ Oe}$) y FC ($H_{FC}=1000 \text{ Oe}$) para el LSMO.

Observamos que la transición magnética en la capa de LSMO no ocurre de forma abrupta por debajo de la T_c , es decir, la transición no es completamente aguda como se espera para ferromagnético ideal. Podemos observar de las medidas de $M(T)$ que la curva de magnetización presenta una extensión de varios Kelvin por encima de la T_c . La no homogeneidad en la muestra pueden causar variaciones en la T_c y la magnetización. El comportamiento de la magnetización en función de la temperatura $M(T)$, lo rige una ecuación tipo exponencial de la forma:

$$M(T, T_c) = m_0 \left(\frac{T - T_c}{T_c} \right)^\beta \theta(T_c - T) \quad 4.2$$

Donde m_0 es un factor proporcional a la magnetización de saturación, T_c es la temperatura de Curie, β es el exponente crítico que describe el comportamiento escalonado de la magnetización en función de la temperatura y $\theta(x)$ es la función de peso, la cual asegura que la magnetización desaparece cuando $T > T_c$. En los sistemas magnéticos se considera cada celda como un sitio de red en el cual se sitúa un momento magnético. Para temperaturas muy altas por encima de T_c , le corresponde un movimiento rápido y arbitrario de los momentos magnéticos y pueden tener cualquier orientación. Cuando la temperatura disminuye hacia el punto crítico, empiezan a aparecer espines correlacionados, hasta que el sistema llega a estar completamente ordenado a la temperatura el cero absoluto. Esto nos permite tomar la magnetización como un promedio y analizar con una distribución estadística el comportamiento de la $M(T)$ alrededor de la T_c a partir de:

$$\langle M(T) \rangle = \frac{1}{V} \int_V M(T, T_c) \rho(T_c, \alpha_i) dT_c \quad 4.3$$

Donde la distribución $\rho(T_c, \alpha_i)$ es determinada por un set de parámetros α_i . Esta distribución se describe asumiendo una función Gaussianana:

$$\rho(T_c, \bar{T}_c, \Delta T_c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \Delta T_c} \exp \left(-\frac{1}{2} \frac{(T_c - \bar{T}_c)^2}{\Delta T_c^2} \right) \quad 4.4$$

Para los cuales los parámetros α_i se definen como temperatura de Curie promedio $\bar{T}_c$ y el ancho de la temperatura ΔT_c . Usando la distribución Gausiana en la integral de la ecuación 4.3, hemos realizado un ajuste de mínimos cuadrados en la región crítica de los datos experimentales de magnetización. A partir de la ecuación 4.4 como una suma de términos de la distribución en nuestras curvas $M(T)$ y de acuerdo con lo reportado por [26], se obtienen los valores de la temperatura de transición (T_c) para cada H_c , así como el ancho en el que ocurre transición (ΔT). En la tabla 4.3, notamos que la T_c no presenta cambios significativos cuando se aplica un campo de enfriamiento en las muestras ($H_{FC}=1000$ Oe).

Tabla 4. 3 Temperaturas de transición T_c de y ΔT para condiciones de ZFC y FC ($H_{FC}=1000$ Oe).

HFC [Oe]	TC [K]	ΔT [K]
ZFC	$337,15 \pm 0,07$	34
1000	$340,25 \pm 0,05$	40

3.2. HISTERESIS MAGNÉTICA

En los óxidos de manganeso con estructura tipo perovskita, la estequiometría de oxígeno juega un papel muy importante, tanto la deficiencia de oxígeno como el exceso produce cambios en su estructura que se ven reflejados en el comportamiento eléctrico y magnético. Las propiedades magnéticas de las muestras están fuertemente influenciadas por la presencia de vacantes de oxígeno, a menor número de estas, la magnetización de saturación y la temperatura de crítica se aproximan a los valores del material masivo, para disminuir estas vacantes es habitual utilizar un tratamiento térmico, en nuestro caso realizando un recocido *in situ* en atmósfera de oxígeno a 400mbar durante 1

hora. Las medidas de magnetización como función del campo magnético aplicado fueron tomadas para las muestras bajo condiciones de campo de enfriamiento cero (ZFC) para temperaturas entre 10 y 350 K (figura 4.8). Es posible observar un comportamiento decreciente en la magnetización de saturación (b) y en el campo coercitivo (c) a medida que la temperatura aumenta.

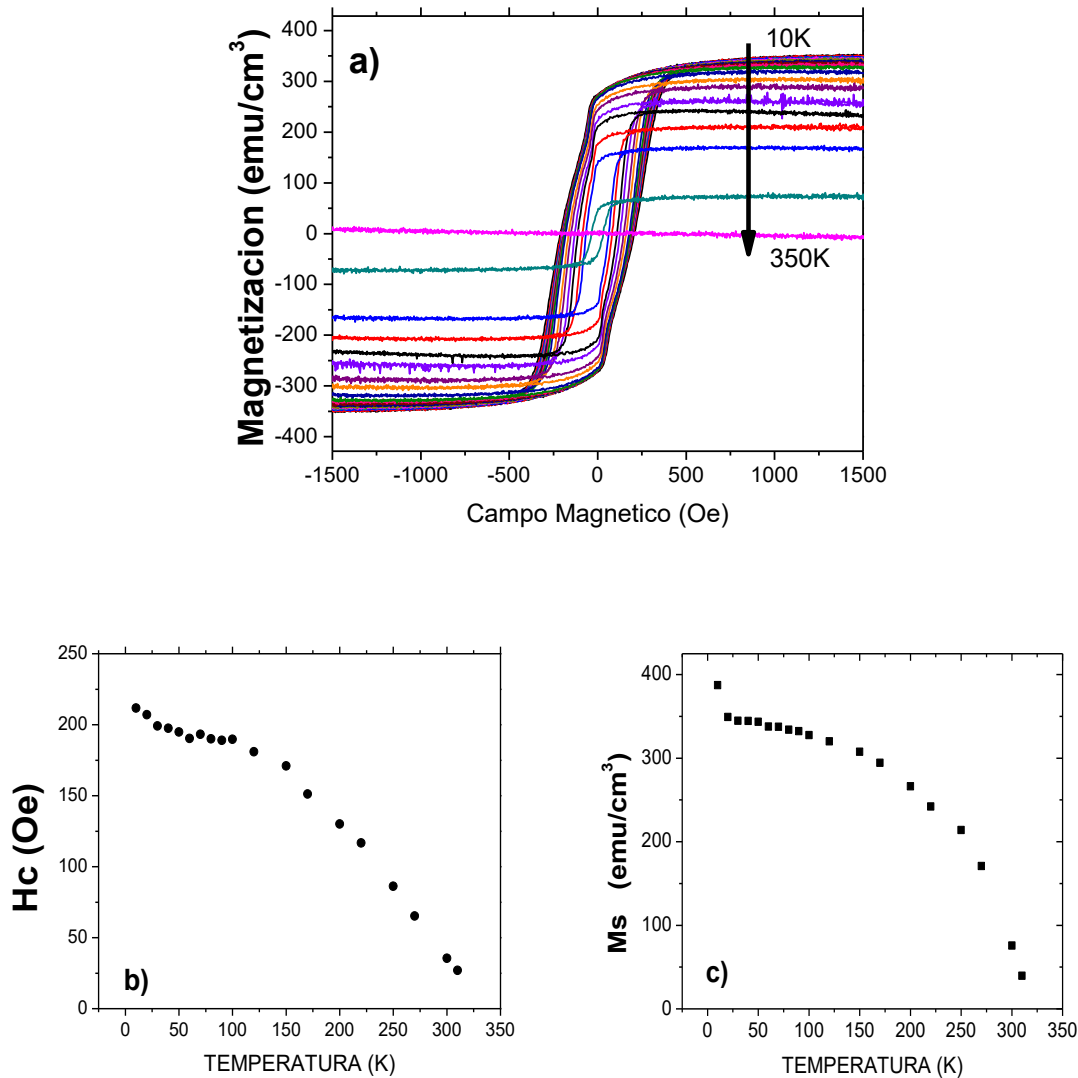


Figura 4. 8 a) Isotermas de histéresis magnética (desde 10K hasta 350K), b) campo coercitivo y c) Magnetización de saturación en función de la temperatura.

Es de resaltar, que la tensión epitaxial juega un importante papel en general sobre todas las manganitas con estructura tipo perovskita y la pérdida del magnetismo y conductividad está presente en muestras muy finas o altamente tensionadas. La

razón más plausible está asociada a las interfaces, es decir, entre el sustrato-película y entre la película y el vacío, donde se produce una ruptura de la simetría que induce cambios en las propiedades debido a una selectiva ocupación orbital que se hace significativa en función del espesor de la película y el porcentaje de desajuste entre el sustrato y la película. Se alcanza una magnetización de saturación alrededor de 387 emu/cm^3 y un campo coercitivo de 211 Oe para una temperatura de 10K lo cual está acorde con lo expuesto en la literatura en este tipo de sistema [3]; mientras que se obtuvo una magnetización de saturación de 76 emu/cm^3 y un campo coercitivo de 36 Oe para una temperatura de 300K , resultado resaltante puesto que estudios realizados en películas delgadas de LSMO, en medidas de magnetización como función del campo magnético aplicado, para diferentes campos de enfriamiento y realizadas a diferentes barridos de temperatura, presentan una disminución en la magnetización de saturación hasta ser nula a temperatura ambiente, en nuestros resultados hay respuesta magnética a temperatura ambiente ideal para el desarrollo de dispositivos como sensores o dispositivos de control.

4. CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA

La fuerte correlación entre las propiedades magnéticas y de transporte es debido a que son los mismos electrones $3d$ los que participan en la conducción y median las interacciones magnéticas. De este modo se observa que el estado de orden FM corresponde a un estado de carácter metálico mientras que por encima de la transición el estado PM se corresponde con otro de carácter aislante (Figura 4.9). La interacción de doble intercambio propuesta por Zener ha sido utilizada para explicar la relación encontrada entre el comportamiento metálico y el ferromagnetismo en estos óxidos como primera aproximación. En la figura 4.9 podemos observar el comportamiento generalizado de la manganita de LSMO crecida sobre un sustrato monocristalino (001) con un espesor de 25nm , a baja temperatura, la magnetización es máxima y la resistividad mínima. Al aumentar la

temperatura, la magnetización (M) se reduce y la resistividad crece; al llegar a T_c se produce una transición metal-aislante T_{MI} , observándose $T > T_c$ (fase paramagnética) un mecanismo de conducción térmicamente activado.

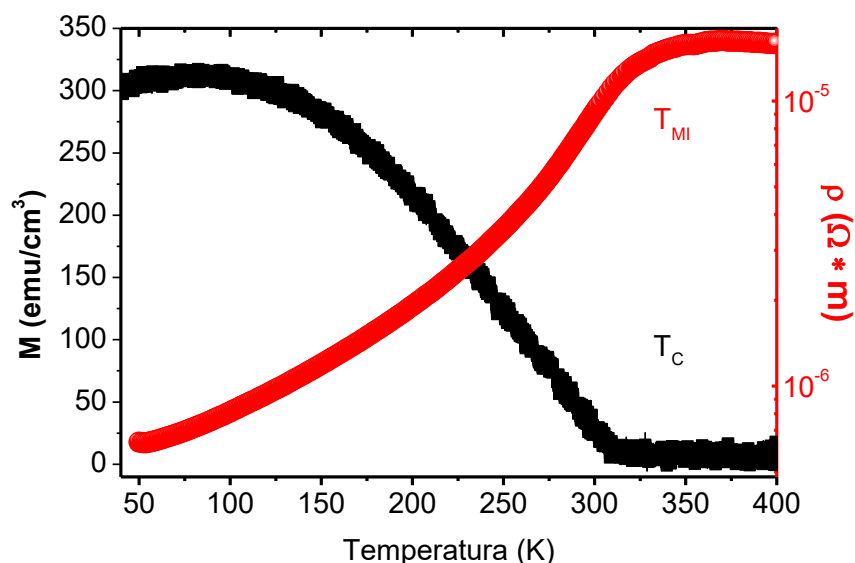


Figura 4. 9 Magnetización y resistividad en función de la temperatura para una capa delgada de LSMO crecida sobre STO. Ambas curvas fueron medidas de baja a alta temperatura.

El efecto de magnetorresistencia, es uno de los fenómenos más interesantes en las perovskitas de manganeso de valencia mixta, la modulación de la transición metal-aislante mediante la aplicación de un campo magnético externo se observa en la figura 4.10. En un rango de temperatura superior hasta una temperatura particular (T_{MI}), el LSMO tiene un comportamiento típico de un aislante, el cual incrementa su resistividad cuando la temperatura disminuye. Mientras que por debajo de esta temperatura, el sistema se comporta como un material conductor, es decir su resistencia disminuye. En la vecindad de la transición PM-FM, la interacción entre las propiedades magnéticas y las propiedades de transporte ha sido explicada parcialmente utilizando la teoría del doble intercambio.

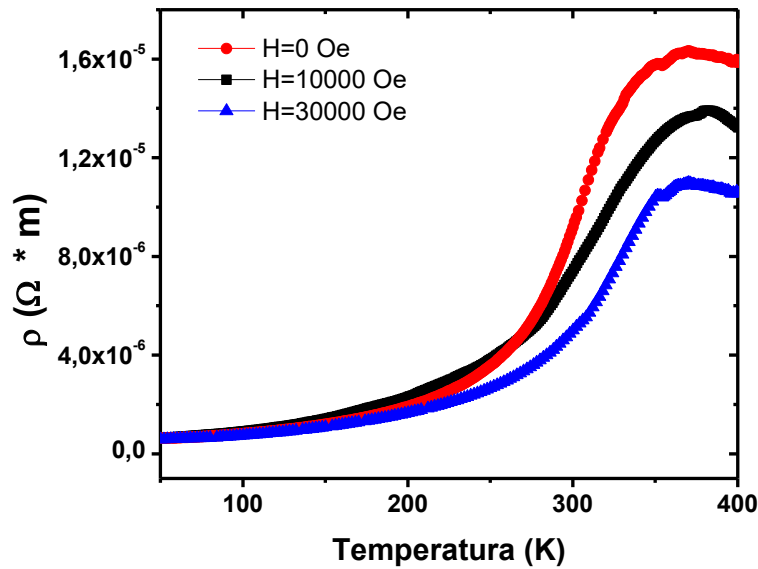


Figura 4. 10 Dependencia de la Resistividad en función de la temperatura para la muestra LSMO/STO, con diferentes campos magnéticos aplicados, en donde se observa una disminución de la resistividad al incrementar el campo magnético aplicado.

Las manganitas son conocidas por presentar un cambio en su resistencia en presencia de campos magnéticos. En nuestro caso hemos aplicado a la muestra a campos de 0 Oe, 10000 Oe y 30000 Oe, en el plano de la superficie de la película en el modo de ZFC (Zero Field Cooling) como se observa en la figura 4.10, estas medidas fueron realizadas siguiendo el método de las cuatro puntas. Se observa como en presencia de un campo magnético aplicado, la respuesta de este es disminuir su resistencia y aumentar la temperatura de transición T_{MI} en comparación con el comportamiento sin campo aplicado, lo cual está de acuerdo con lo reportado por diferentes autores [27]. La transición M-I para esta capa delgada es de $\sim 352K$, como lo demuestran otros estudios la T_{MI} depende del área (espesor), es decir depende de las tensiones.

Como se observa en la figura 4.11; para bajas temperaturas, es decir $T < T_{MI}$, la dependencia de la resistividad con la temperatura puede ser asociada al modelo $\rho(T) = \rho_0 + AT^\alpha$ donde ρ_0 , A y α son parámetros libres. ρ_0 es la resistividad residual atribuida a la pureza y defectos estructurales que puede tener un material,

y AT^α referente a las posibles dispersiones presentes en el proceso. A bajas temperaturas ($T < T_c$), las dispersiones electrón-electrón y magnon-magnon y efectos polaronicos son clave para promover propiedades de transporte. En previas investigaciones la desviación cuadrática ha sido modificada como la combinación de términos debido a las diferentes dispersiones. Donde sí $\alpha=2$ es debido a una dispersión electrón-electrón [28], $\alpha=3$ se refiere a magnon anómalo [27], $\alpha=4,5$ a una dispersión magnon-magnon [29] y $\alpha=3,5$ a ondas de espin.

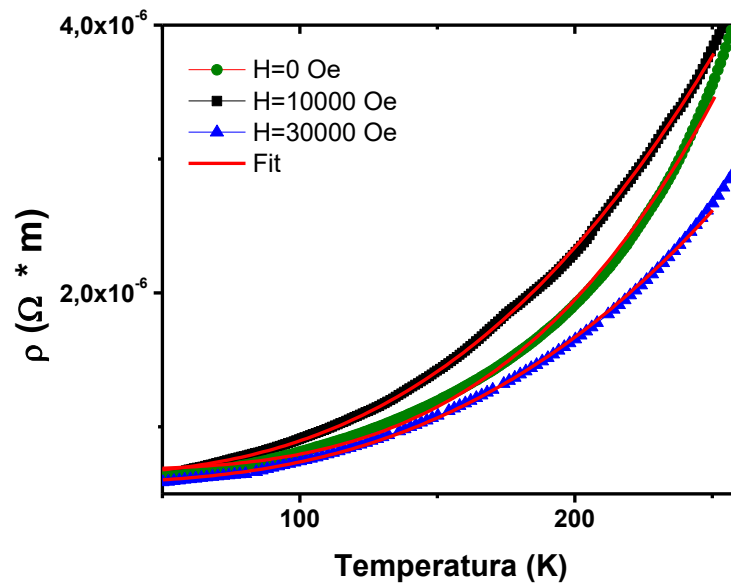


Figura 4. 11 Ajustes de la resistividad en función de la temperatura para bajas temperaturas mediante la expresión: $\rho(T) = \rho_0 + AT^\alpha$.

En la figura 4.12, se observa la resistencia en función del campo magnético aplicado, obteniendo un comportamiento magnetorresistivo de la capa de LSMO a temperaturas cercanas y por debajo de la transición, es decir la muestra se encuentra en el estado FM. Se observa un comportamiento histérico con simetría, en el cual los portadores se desplazarán dentro del material con menor oposición al paso de corriente, en presencia del campo magnético, además se observa que al disminuir la temperatura el cambio en la resistencia del material es más bajo, con lo cual la resistencia comienza a ser independiente del campo magnético.

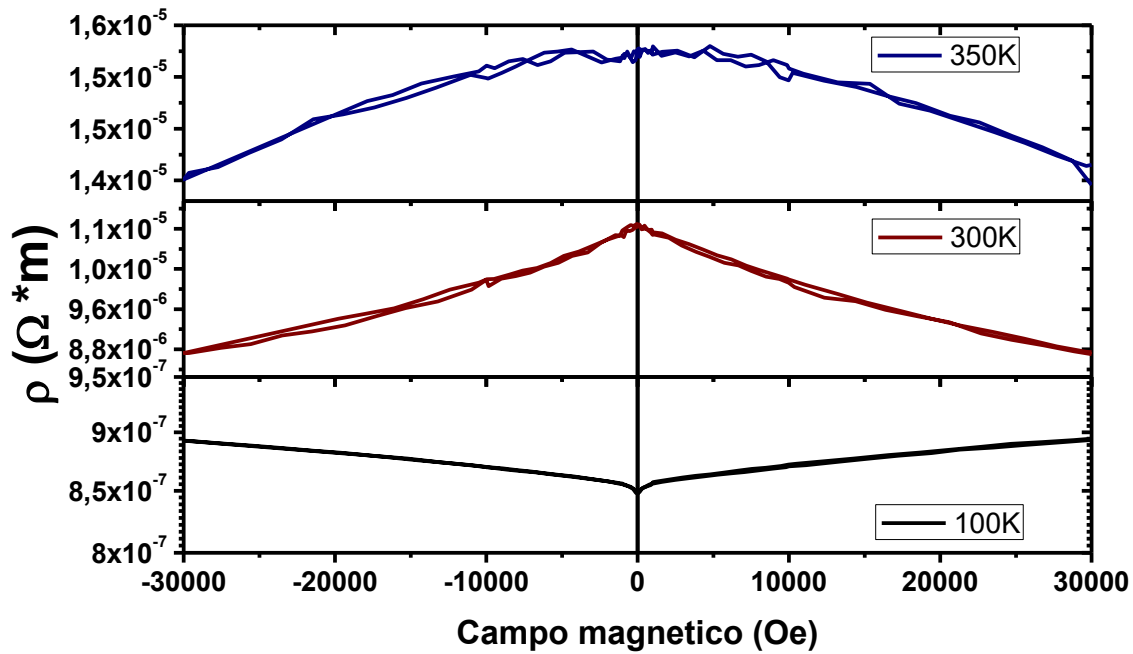


Figura 4. 12 Dependencia de la Resistividad con el campo magnético aplicado a temperaturas en la región ferromagnética de la película de LSMO.

El cambio de resistencia como función del campo magnético a 350K, las cuales corresponden al régimen FM del material cuando el campo magnético cambia entre 100 Oe y 30000 Oe se observa en la figura 4.13. Se observa el comportamiento magnetorresistivo de la capa LSMO a temperaturas debajo de la transición, es decir la muestra se encuentra en el estado FM. En este fenómeno los portadores se desplazan dentro del material con menor oposición al paso de la corriente, en presencia del campo magnético. Se calculó el valor de magnetorresistencia mediante la ecuación 4.5 y se obtuvo un valor de 13% para el mayor campo aplicado (30KOe) a una temperatura de 350K, ver figura 4.13. Para campos bajos, se observa poca o casi nula el valor de magnetorresistencia, mostrando su alta densidad de fronteras de grano, lo cual es una clara evidencia de que las muestras tienen una baja densidad de defectos estructurales, resultado complementario de las medidas obtenidas por DRX y AFM. Resultados similares a los reportados por [30].

$$MR (\%) = \frac{R_0 - R_H}{R_0} \times 100 \quad 4.5$$

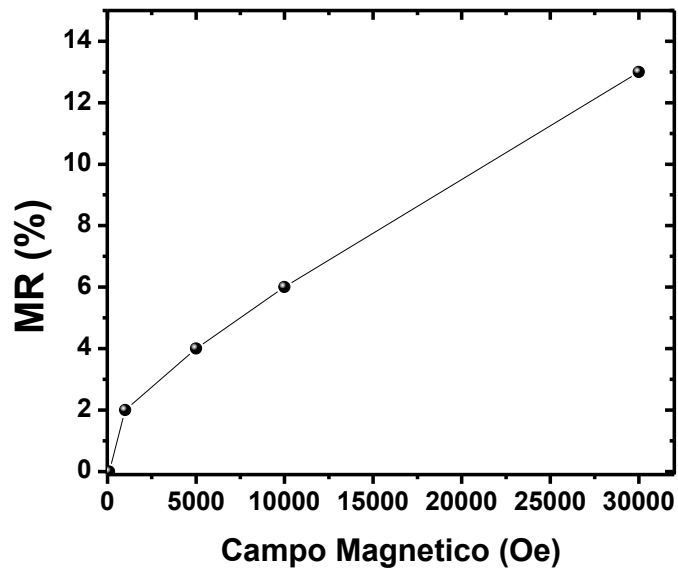


Figura 4. 13 Porcentaje de magnetorresistencia en función del campo magnético aplicado a una temperatura de 350K.

Adicionalmente mediante la técnica de cuatro puntas y un portamuestras adaptado al criostato ubicado en el laboratorio de películas delgadas, se realizó unas curvas de corriente en función del voltaje a 50K y 300K. Ambas curvas presentan un comportamiento óhmico como se muestra en la figura 4.14.

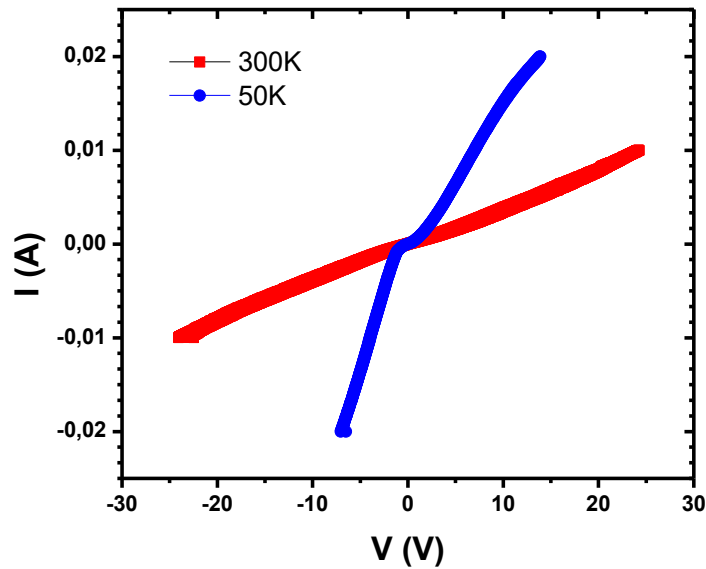


Figura 4. 14 Curvas de corriente en función del voltaje a 50K y 300K para la película delgada LSMO/STO

Teniendo como punto de partido el control de las propiedades estructurales, eléctricas y magnéticas de nuestras capas de LSMO, pasamos a la fabricación de los dispositivos.

5. FABRICACIÓN DE DISPOSITIVOS

La fabricación de los hilos a partir de estructuración de películas de LSMO/STO mediante el proceso de litografía óptica, con la colaboración de la MSc, Claribel Dominguez en la Universidad de Ginebra, Suiza. Esta técnica nos permite imprimir sobre la capa de LSMO un determinado motivo para la caracterización de los micro dispositivos, a través de medidas de magnetotransporte. Para evitar defectos en los dispositivos este proceso se realizó en un cuarto limpio, con una temperatura y humedad controladas. Después de imprimir sobre la capa delgada

de LSMO los motivos del dispositivo (diferentes hilos de ancho y largo, un hilo conectado a 6 electrodos, dos para aplicar la corriente y cuatro para medir el voltaje inducido en la muestra) y someter a la muestra a diferentes etapas donde se involucran procesos químicos y físicos (etching). En la figura 4.15 se muestran las micrografías de los diferentes hilos utilizando la microscopía electrónica de barrida - SEM, las cuales fueron realizadas con la colaboración del Ing. John Schneider Betancourt del CENM, donde podemos identificar sus dimensiones de los hilos, las cuales se especifican en la tabla 4.4., hemos visto en función de su resistividad que el proceso de litografía óptica nos permite preservar las características del sistema LSMO sin afectar la respuesta del sustrato.

Tabla 4. 4 Dimensiones ancho y largo de dispositivo estructurados por OL.

DISPOSITIVO	ANCHO (μm)	LARGO (μm)	ANCHO/LARGO (a/l)
1	10	300	0.033
2	10	150	0.067
3	25	300	0.083
4	25	150	0.167

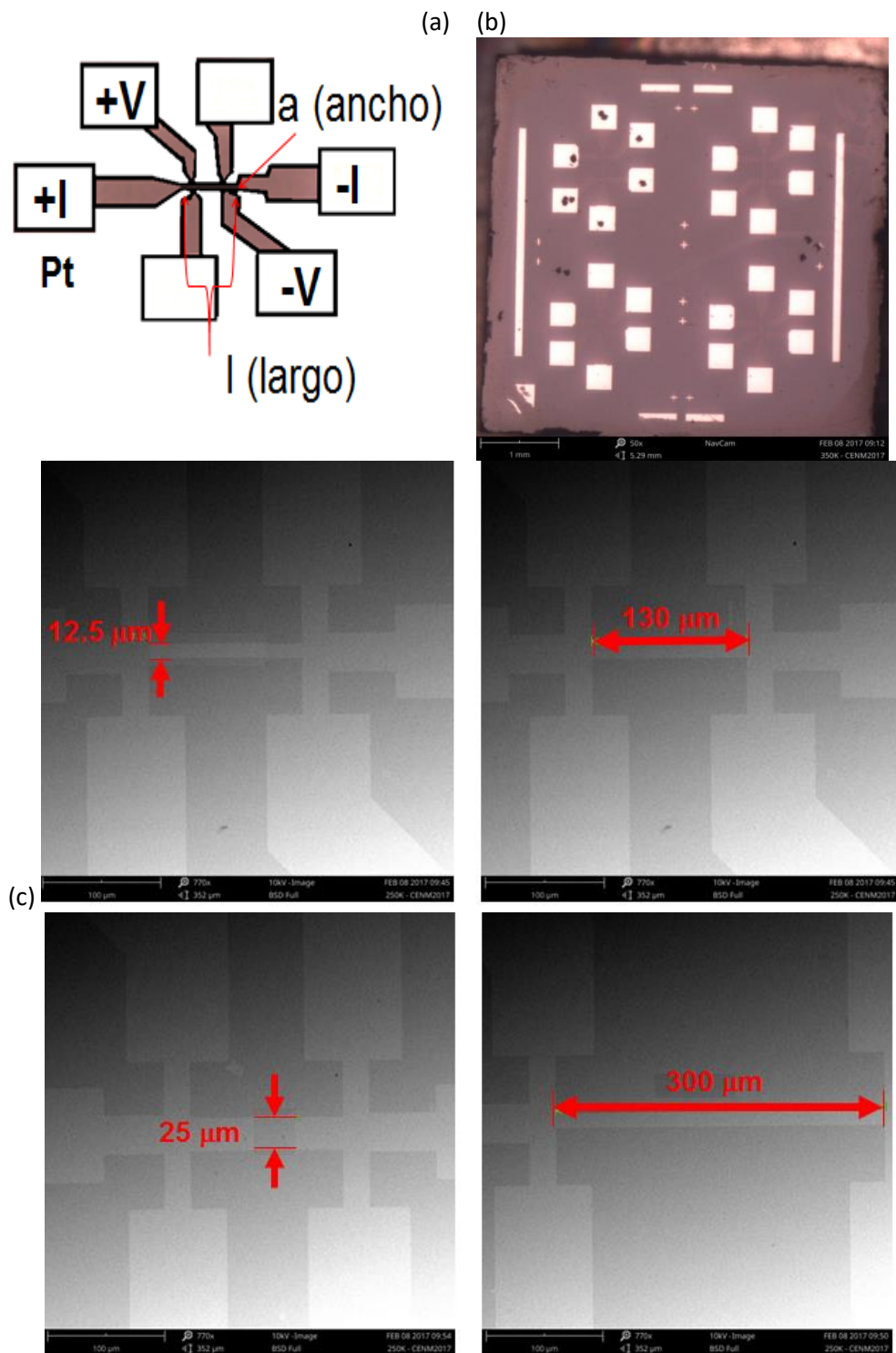


Figura 4. 15 (a) Esquema del dispositivo, imágenes SEM: (b) de los cuatro dispositivos estructurados por litografía óptica y (c) diferentes anchos y largos de los dispositivos.

6. CARACTERIZACIÓN DE DISPOSITIVOS

Para poder evaluar su posible aplicación como sensor magnetorresistivo, ahora pasamos a estudiar su respuesta eléctrica frente al campo magnético externo aplicado (H). En la figura 4.16, observamos la resistividad en función de la temperatura para cada dispositivo con las diversas relaciones de a/l sin campo magnético externo aplicado ($H=0$ Oe) contrastado con los valores de la película (sin estructurar). Observándose una transición metal-aislante superior a la temperatura ambiente ($T=300$ K) en todos los casos. Se evidencia un aumento de la resistividad así como aumento de la T_{MI} al disminuir la relación a/l de los dispositivos, esto puede ser ocasionado debido al aumento de vacancias de oxígeno generadas durante el proceso de *etching* físico con iones de Ar en la estructuración por litografía.

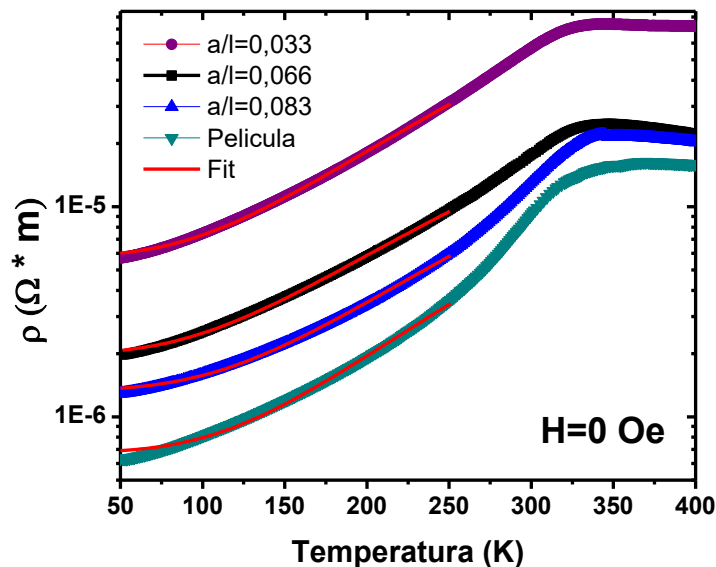


Figura 4. 16 Resistividad en función de la temperatura para cada relación a/l sin campo magnético aplicado.

En la figura 4.17, observamos la resistividad en función de la temperatura para cada dispositivo con las diversas relaciones de a/l con diferentes campos magnéticos externos aplicados ($H= 0$ Oe, 100 Oe, 1 kOe, 5 kOe, 10 kO y 30 kOe) en el plano del hilo contrastado con los valores de la película (sin estructurar). En donde se puede evidenciar una transición metal-aislante superior a la temperatura ambiente ($T=300$ K), desde un estado metálico a baja temperatura –FM a un estado aislante de alta temperatura-PM. Se aprecia una disminución de la resistividad así como aumento de la T_{MI} al aumentar el campo magnético externo en función de la temperatura, demostrando que el proceso de fabricación es óptimo.

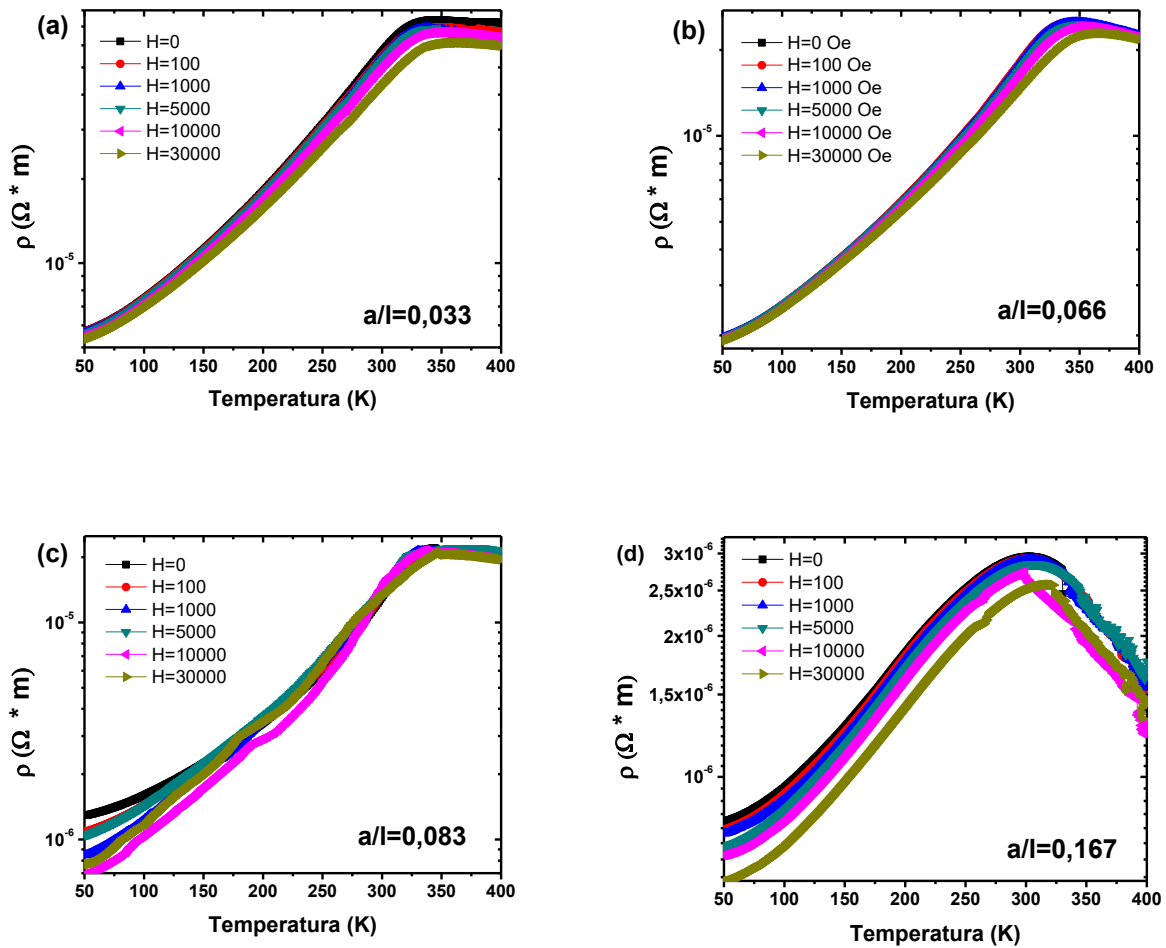


Figura 4. 17 Resistividad en función de la temperatura para los diferentes campos magnéticos aplicados a cada relación a/l : (a) 0,033, (b) 0,066, (c) 0,083 y (d) 0,167.

Sin embargo se observa una disminución de la T_{MI} en función que decrece la relación a/l con respecto a la película debido a efectos elásticos y orbitales [31]. Al reducir el ancho observamos una tendencia hacia valores del material masivo. En trabajos de microhilos se ha reportado un comportamiento aislante al reducir el ancho en todo el rango de temperatura [27]. Este resultado demuestra la alta calidad del proceso de fabricación realizado.

La física de los óxidos altamente correlacionados, como es el caso de las manganitas, parece estar dominada por estados con falta de homogeneidades intrínsecas en escala nano y/o microscópica, las cuales son promovidas durante el *etching* en la litografía y son evidenciadas con la respuesta del material.

Un entendimiento de la física que gobierna las manganitas ha requerido un gran esfuerzo reflejado en el importante número de trabajo de investigaciones [27]. Uno de los principales tópicos se ha enfocado en las interacciones entre los grados de libertad de espín, carga, red, y orbita [32]. Esta complejidad electrónica tiene consecuencias en las potenciales aplicaciones de estos materiales, puestos que no solo la carga y el espín son de relevancia, sino que lo son además los grados de libertad de la red y orbitales. Esto induce que ante perturbaciones pequeñas del sistema la respuesta sea “gigante”.

En la figura 4.18, se observa la resistividad residual ρ_0 y el exponente referente a la dispersión en proceso α , en función de la relación ancho/largo de cada dispositivo (ajuste en figura 4.16). En donde se presenta un aumento en la resistividad residual en función que disminuye la relación ancho/largo de los hilos presentes en el dispositivo, esto se atribuye a tensiones en el sistema generadas por el proceso de litografía durante el ataque físico o bombardeo con argón, en donde además aumenta la posibilidad de tener pérdidas de oxígeno presentes en la muestra inicialmente. Adicionalmente se puede identificar un cambio de fenómenos de dispersión en la muestra conforme disminuye la relación ancho/largo, donde para mayores relaciones predomina una dispersión electrón-electrón, pero a medida que se disminuye la relación ancho/largo presentamos

una dispersión por un único magnon anómalo, hasta estar cerca de una dispersión por onda de espín.

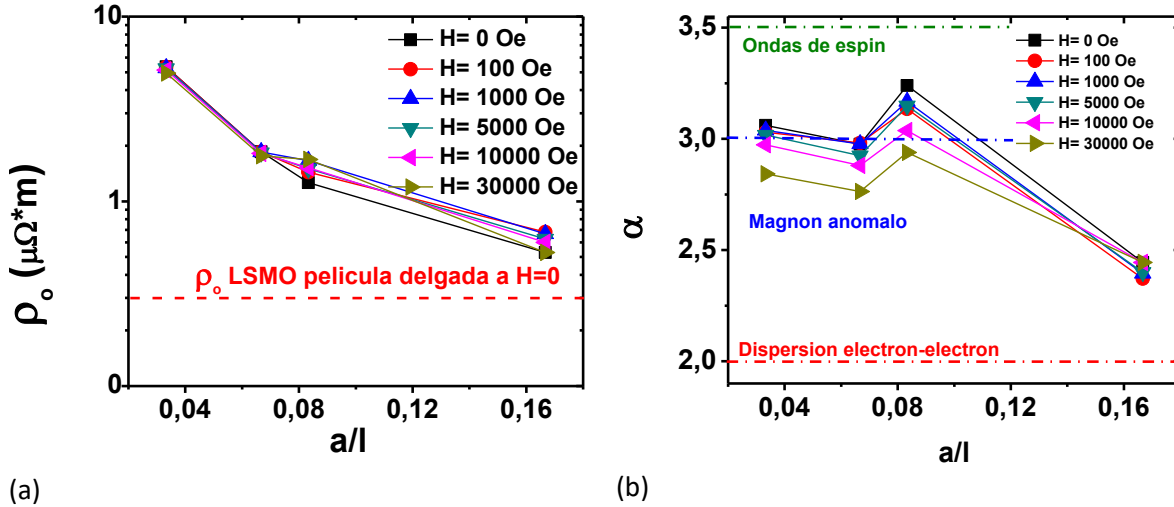
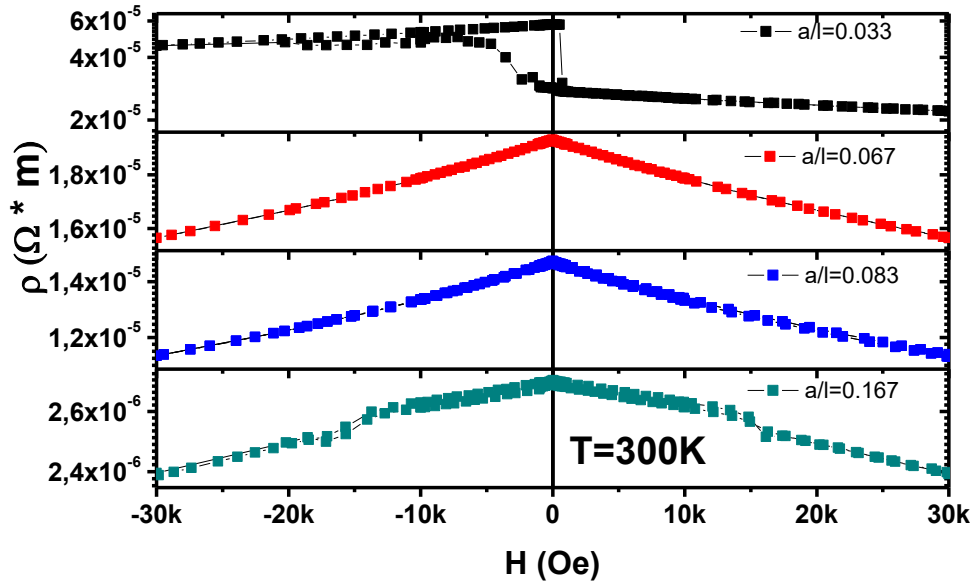
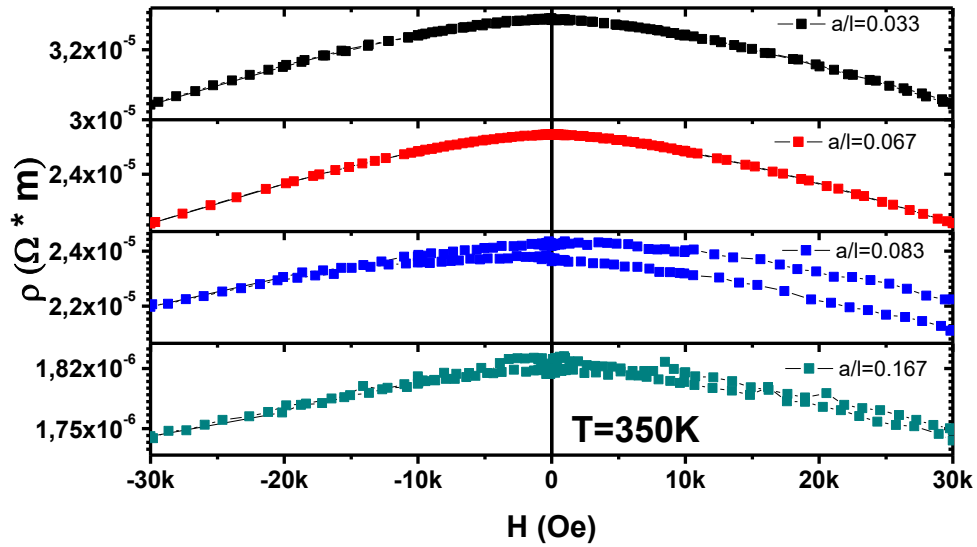


Figura 4. 18 (a) Resistividad residual ρ_0 y (b) exponente de dispersión α a baja temperatura como función de la relación ancho/largo (a/l).

Posteriormente, en la figura 4.19 se muestra la resistencia en función del campo magnético aplicado, para los 4 dispositivos. Las medidas fueron realizadas a temperaturas cercanas a la transición M-I ($T=350K$) y por debajo de la transición ($T=300K$), es decir la muestra se encuentra en el estado FM. Se observa un comportamiento histérico más fuerte para bajas relaciones de ancho/largo de los dispositivos en presencia del campo magnético externo aplicado, lo que favorece que los portadores se desplacen dentro del material con menor oposición al paso de corriente, además se observa que para bajas relaciones ancho/largo hay un aumento de la resistividad en los hilos, lo cual es atribuido a la pérdida de oxígeno causado por el ataque físico para estructurar las muestras durante el proceso de litografía, esto es consistente cuando el LSMO es depositado a bajas presiones de O_2 o sin recocido [27]. Adicionalmente, se observa que disminuye como es de esperarse la resistencia en función que aumenta la temperatura, el cambio en la resistencia del material es más bajo, con lo cual la resistencia comienza a ser independiente del campo magnético.



(a)



(b)

Figura 4. 19 Dependencia de la Resistividad con el campo magnético aplicado a temperaturas en la región ferromagnética del LSMO (a) $T=300K$ y (b) $T=350K$ para los cuatro dispositivos estructurados.

En la figura 4.20 se observa el cambio de resistencia como función de la relación ancho/largo (a/l) de los cuatro dispositivos en la temperatura en la cual los hilos presentan un pico, correspondiente todavía a un régimen ferromagnético del material (T_{MI}) cuando el campo magnético aplicado varía desde 100 Oe hasta 30.000 Oe. En este fenómeno los portadores se desplazan dentro del material con menor oposición al paso de la corriente, en presencia del campo magnético. Se calculó el valor de magnetorresistencia mediante la ecuación 4.5. Se obtuvo un valor de ~18% para el mayor campo magnético aplicado (30K Oe) para el menor valor de relación ancho/largo de los dispositivos, debido a que las tensiones generadas por la pérdida de oxígeno y la tensión generada por el cambio de parámetro con el sustrato favorece este fenómeno, ver figura 4.19. Para campos bajos, se observa poco cambio o respuesta de magnetorresistencia, sin embargo mejora al disminuir la relación mencionada.

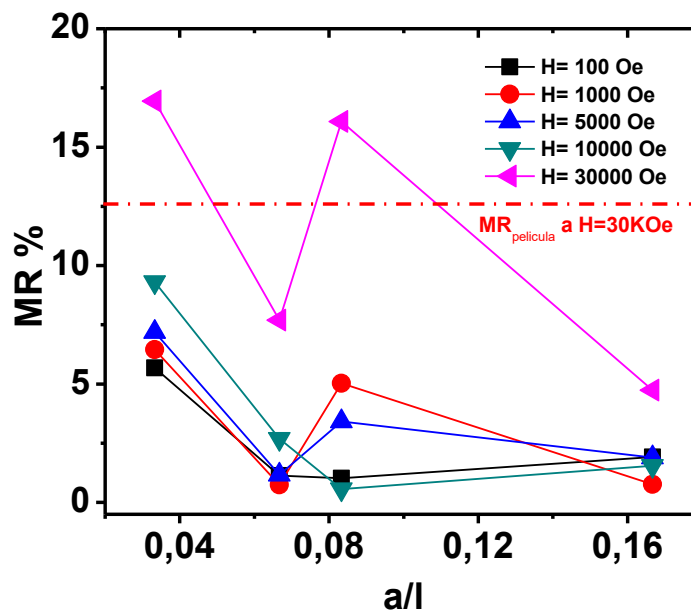


Figura 4. 20 Magnetorresistencia (MR%) en función de la relación ancho/largo (a/l) para diferentes campos magnéticos aplicados.

CAPITULO V

CONCLUSIONES

- Se han crecido satisfactoriamente las películas delgadas de $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ sobre sustratos monocristalinos de SrTiO_3 con orientación (001) mediante el sistema de pulverización catódica asistido por DC. Los análisis de superficie por rayos X y morfología mediante AFM, nos permiten afirmar que las muestras presentan un crecimiento texturado sobre el sustrato y no se evidencia fases adicionales, adicionalmente las películas presentan granos esféricamente definidos con una baja rugosidad superficial.
- Las medidas de magnetización térmica permitieron obtener un valor de temperatura de Curie (T_c) mayor a la temperatura ambiente, temperatura a la cual pasa de ser un material ferromagnético a paramagnético.
- Empleando la técnica de litografía óptica fue posible obtener estructurar los dispositivos con diferentes dimensiones de ancho y largo que permitieron estudiar sus propiedades eléctricas y magnéticas y como se ven afectadas con la reducción de sus dimensiones.
- A partir de las medidas eléctricas, específicamente graficas de resistividad en función de la temperatura para las películas delgadas de LSMO/STO presentan una transición metal aislante superior de los 350K; y posteriormente, se observa que conserva sus propiedades metálicas a temperatura ambiente al ser estructurada mediante litografía óptica para sus diferentes relaciones de ancho y largo (a/l), resultado importante para la implementación en el desarrollo de dispositivos.

- Al evaluar las propiedades de transporte del sistema LSMO/STO, se observa una disminución de su resistencia en función de que aumenta un campo magnético externo aplicado, tal como es reportado por otros autores [31], propiedad reportada en óxidos complejos y conocida como magnetorresistencia, la cual para la película delgada alcanzo un valor hasta del 13% para el mayor campo aplicado, posteriormente al ser estructurados los dispositivos se observa un aumento de hasta el 18% para la menor relación de ancho/largo (a/l), respuesta posiblemente atribuida al aumento de vacancias de oxígeno ocasionadas durante el *etching* físico con Argón en la litografía y debido a que las tensiones generadas por el cambio de parámetro con el sustrato.
- Respecto a la respuesta de su resistividad en función del campo, se observa un comportamiento histérico más fuerte para bajas relaciones de ancho/largo de los dispositivos en presencia del campo magnético externo aplicado, lo que favorece que los portadores se desplacen dentro del material con menor oposición al paso de corriente, además se observa que para bajas relaciones ancho/largo hay un aumento de la resistividad en los hilos, lo cual es atribuido a la pérdida de oxígeno causado por el ataque físico para estructurar las muestras durante el proceso de litografía, esto es consistente cuando el LSMO es depositado a bajas presiones de O_2 o sin recocido [27], esta respuesta es favorable para el desarrollo de dispositivos magnetorresistivos tal como es reportado por otros autores (Bacells, Calvo, & Fontcuberta, 2002).

CAPITULO VI

DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

Los resultados de este trabajo fueron condensados en un artículo, el cual en la actualidad se encuentra sometido en una revista indexada para su publicación:

2/9/2017

Correo de Universidad del Valle • Solicitud Corrección Artículo ID 293 [4th IMRMPT]



ISABEL CRISTINA ARANGO GUTIERREZ <isabel.arango@correounivalle.edu.co>

Solicitud Corrección Artículo ID 293 [4th IMRMPT]

[IMRMPT] International Meeting for Researchers <imrmpt@gmail.com>

25 de agosto de 2017, 11:04

Para: ISABEL CRISTINA ARANGO GUTIERREZ <isabel.arango@correounivalle.edu.co>

Estimada Autor,

Confirmamos recibido de la versión corregida del manuscrito ID 293, sometido a publicación en el volumen del Journal of Physics: Conference Series de la IOP correspondiente al 4th IMRMPT, conferencia realizada en la ciudad de Santa Marta del 23 al 26 de mayo de 2017.

Agradecido por la atención,

Cordial saludo,

Editor

International Meeting for Researchers in Materials and Plasma Technology (4th IMRMPT)
Foundation of Researchers in Science and Technology of Materials (FORISTOM)
Grupo de Física Mesoscópica, Universidad Nacional de Colombia
Grupo de Física Computacional en Materia Condensada (FICOMACO), UIS
Grupo de Investigación en Física y Tecnología del Plasma y Corrosión (FITEK), UIS
<http://foristom.org/4imrmpt>

[El texto citado está oculto]

Adicionalmente, este trabajo de investigación ha sido presentado en los siguientes eventos:



CERTIFICATION

The chairman of Fourth International Meeting for Researchers in Materials and Plasma Technology (4th IMRMPT) certifies that:

I C Arango, J E Ordoñez C Domínguez, C Arango and M E Gómez

They presented the work entitled:

Detailed study of the magnetic behaviour at low scale in $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$

Conference held 23 to 26 May 2017 in Santa Marta, Colombia.

For its constancy, it is signed in Santa Marta 26 May 2017.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'H. Paredes'.

HAROLD PAREDES GUTIÉRREZ
Chairman
4th IMRMPT Conference

Fourth International Meeting for Researchers in Materials & Plasma Technology (4th IMRMPT)
jncmpt@gmail.com



XII Semana
Universitaria
de Ingeniería
09 al 16 de Octubre de 2015

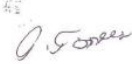


Certifica que:

Isabel Arango, John Ordoñez, Sebastián Arevalo, Alba Avila y María Gómez

Presentaron la ponencia titulada
"Estudio de propiedades magnéticas y de transporte en películas delgadas de $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ con posible aplicación en sensores"
en el marco del **8° Simposio de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería**,
realizado en Cali del 9 al 16 de Octubre del 2015.


Carlos Arturo Lozano Moncada
Decano


Patricia Torres Lozada
Vicedecana de Investigación y Posgrados

Facultad de Ingeniería. 70 años formando líderes y aportando conocimiento para el desarrollo del país



Manizales, 24 de Agosto de 2015

SR. Isabel Arango.

Asunto: Aceptación Resumen "XXVI CONGRESO NACIONAL DE FÍSICA – MANIZALES 2015"

Me complace informarle que entre el 29 de Septiembre y el 2 de Octubre del presente año se dará lugar en la ciudad de Manizales al "XXVI CONGRESO NACIONAL DE FÍSICA", evento en el cual se presentarán expositores y conferencistas nacionales e internacionales, desarrollando temas afines con las ciencias físicas.

Motivo por el cual para nosotros es un honor extenderle la cordial invitación al evento que ofrecerá una programación científica variada en el ámbito de las ciencias físicas que serán de gran utilidad para todos y cada uno de los participantes.

Con el deseo de contar con su participación en el evento, recibe nuestro cordial saludo y le informamos que su trabajo titulado "ESTUDIO DE PROPIEDADES MAGNETICAS Y DE TRANSPORTE EN PELICULAS DELGADAS DE $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ " ha sido aceptado. A partir del 4 de septiembre se informará sobre la modalidad bajo la cual ha sido aceptado (oral o poster). Se le sugiere tener en cuenta las recomendaciones asociadas a la presentación de la respectiva modalidad, las cuales encontrará en la página www.xxvi-cnf.co

Atentamente,



Dr. Carlos Vargas Hernández
Director "XXVI CONGRESO NACIONAL DE FÍSICA – MANIZALES 2015"
Universidad Nacional De Colombia
Sede Manizales

Para mayor información sobre el congreso favor remitirse a la página web del evento.

<http://www.xxvi-cnf.co>



Certificate of Poster Presentation

The Organizing Committee of the 20th International Conference on Magnetism is delighted to certify that the paper entitled

RESISTANCE BEHAVIOR IN NANOSTRUCTURED $\text{La}_2\text{3Sr}_1\text{3MnO}_3$ THIN FILM

with authors

Mrs Isabel Arango
Prof. Maria Gomez
Prof. Alba Avila
Prof. Pedro Prieto

has been presented as a poster during the conference, celebrated on July 5th to 10th, 2015 in Barcelona, Spain

Amílcar Labarta

Prof. Amílcar Labarta
 President of ICM2015

ICM2015 has been hosted by:



IV CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA FÍSICA



CERTIFICA QUE:

ISABEL CRISTINA ARANGO GUTIERREZ

Participó en el IV Congreso Nacional de Ingeniería Física,
 Realizado del 22 al 26 de septiembre de 2014 en la ciudad de Popayán - Colombia.

En calidad de: PONENTE

Julio César Diago
 Director CECAV

Claudia F. Villaquirán R.
 Claudia Fda. Villaquirán
 Jefe Departamento Física

Sonia Gaona Jurado
 Sonia Gaona Jurado
 Comité Organizador

BIBLOGRAFÍA

- [1] V. H. Quispe Chejo, «APLICACIONES INDUSTRIALES DE LA NANOTECNOLOGIA,» *Revista de Información, Tecnología y Sociedad*, p. 58, 2010.
- [2] E. Silvera, «Nanomagnetismo, espintronica...¿Hasta donde llegaremos?,» *Blog de Emilio Silvera V.*, 2013.
- [3] A.-M. Haghiri-Gosnet y J.-P. Renard, «CMR manganites: physics, thin films and devices,» *J. Phys. D: Appl. Phys.* 36 , p. R127–R150, 2003.
- [4] V. Novickij, V. Stankevic, A. Grainys, J. Novickij y S. Tolvaisiene, «Experimental Setup for Magnetoresistance Analysis of Lanthanum Manganites Thin Films,» *ELECTRONICS AND ELECTRICAL ENGINEERING*, pp. 47-50, 2012.
- [5] N. Zurauskienė, S. Balevicius, V. Stankevic, S. Kersulis, M. Schneider, O. Liebfried, V. Plausinaitiene and A. Abrutis, "B-Scalar sensor using CMR effect in thin polycrystalline manganite films," *IEEE Trans. Plasma Sci*, pp. 411-416, 2011.
- [6] J. Sacanella, F. Parisia, P. Levya y L. Ghiveler, «Magnetoresistive memory in phase-separated $\text{La}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{MnO}_3$,» *Physica B*, pp. 43-46, 2004.
- [7] P. Prieto, L. Marin, S. Diez, J. Ramirez y M. Gomez, «Influence of layer-thickness ratio on magnetic properties in F- $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ /AF- $\text{La}_{1/3}\text{Ca}_{2/3}\text{MnO}_3$ bilayers,» *Journal of Superconductivity and novel magnetism*, 25, 2012.
- [8] T. Hotta, Y. Takada y H. Koisumi, *Int. J. Mod. Phys B* 12, p. 3437, 1998.
- [9] N. Panwar, I. Coondoo, V. Sen y S. Agarwal, «Advance in ceramics - Electronic and Magnetic Ceramics, Bioceramics and Environment,» 2011.

- [10] P. Schiffer, A. Ramirez, W. Bao y S. Cheong, *Phys, Rev. Lett* 75, p. 3336, 1995.
- [11] A. Urushibara, Y. Moritomo, t. Arima, A. Asamitsu, G. Kido y Y. Tokura, *Phys. Rev B* 51, p. 14103, 1995.
- [12] A. Urushibara, Y. Moritomo, T. Arima, A. Asamitsu y K. G, «Insulator-metal transition and giant magnetoresistance in $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$,» *Physical Review B*, pp. 14103-14109, 1995.
- [13] A. Pomar, J. Santiso, F. Sandiumenge, J. Roqueta, B. Bozzo, C. Frontera, L. Balcells, B. Martinez and Z. Konstantinovi, "Growth kinetics engineered magnetoresistance response in $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ thin films.," *Applied Physics Letters* 104, p. 152406, 2014.
- [14] L. Bacells, E. Calvo and J. Fontcuberta, "Room temperature anisotropic magnetoresistive sensor based on manganese perovskite thick films.," *Journal of Manetism and Magnetic Materials*, pp. 242-245, 2002.
- [15] P. Moonen, B. Vratzov, W. Smaal y B. Kjellander, «Flexible thin-film transistors using multistep UV nanoimprint lithography. Organic,» *Electronics* 13, p. 3004–3013., 2012.
- [16] C. Acikgoz, M. Hempenius, J. Huskens y G. Vancso, «Polymers in conventional and alternative lithography for the fabrication of nanostructures,» *European Polymer Journal*, 2011.
- [17] E. Vlahova, T. Donchevb, A. Spasovb, K. D. Orrc y K. Nenkova, «Structural and magnetotransport properties of magnetron sputtered $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ thin films,» *Vacuum* 69 , p. 249–253, 2003.
- [18] L. Bacells, A. Carrillo, B. Martinez, B. Sandiumenge y J. Fontcuberta, «Room temperature magnetoresistive sensor based o thick films manganese perovskite.,» *Journal of Manetism and Magnetic Materials*, pp. 224-230, 2000.
- [19] R. Skomski, Simple models of magnetism, OXFORD University Press, 2008.
- [20] B. Cullity and C. Graham, Introduction to magnetic materials, IEEE Press Editorial Board, 2009.

- [21] D. Tobia, "Efectos de superficie e interacción de intercambio en nanopartículas magnéticas," Instituto Balseiro, 2011.
- [22] J. Ramirez, F. Perez, M. Gomez y P. Prieto, «Statistical study of AFM images on manganite thin films,» *Physics State Solid*, vol. 1, pp. s13-s16, 2004.
- [23] I. Van der Pauw, «A method of measuring specific resistivity and hall effect of disc of arbitrary shape,» *Philips research reports*, pp. 1-9, 1958.
- [24] G. Moore, «Cramming more components onto integrated circuits,» *Electronics* 38, pp. 1-3, 1965.
- [25] T. Balla, S. Spearing y A. Monk, «An assessment of the process capabilities of nanoimprint lithography,» *J. Phys. D: Appl. Phys*, p. 174001, 2008.
- [26] G. Campillo, M. Gomez, A. Hoffmann, R. Escudero y P. Prieto, «Influence of ferromagnetic thickness on structural and magnetic properties of exchange-biased manganite superlattice,» *journal of applied physics*, 2006.
- [27] L. Marin, L. Morellon, P. A. Algarabel, L. A. Rodriguez, C. Magen, J. M. De Teresa y M. R. Ibarra, «Enhanced Magnetotransport in Nanopatterned Manganite Nanowires,» *Nano Letters*, vol. 14, pp. 423-428, 2014.
- [28] S. Mercone, C. A. Perroni, V. Cataudella, C. Adamo, M. Angeloni, C. Aruta, G. De Filippis, F. Miletto, A. Oropallo, P. Perna, A. Y. Petrov, U. Scotti di Ucci y L. Maritato, «Transport properties in manganite thin films,» *Physical Review B*, vol. 71, p. 064415, 2005.
- [29] J. E. Ordoñez, M. E. Gomez y W. Lopera, «Influence of ferroelectric layer on artificial multiferroic LSMO/BTO bilayers deposited by DC and RF sputtering,» *Revista Mexicana de Fisica*, vol. 62, pp. 543-548, 2016.
- [30] M. Zhang, J. Li, Z. Peng, S. Li, D. Zheng, A. Jin, C. Gu, R. Li y C. Liu, «Enhanced extrinsic magnetoresistance in $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ artificial grain boundaries induced by ion implantation,» *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 316, pp. L1-L4, 2007.
- [31] A. Pomar, F. Santiso, J. Sandiumenge, B. Roqueta, B. Bozzo, C. Frontera, L. Balcells, B. Martinez y Z. Konstantinovi, «Growth kinetics engineered

- magnetoresistance response in $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ thin films,» *Applied Physics Letters*, p. 152406, 2014.
- [32] M. Nord, P. Vullum, M. Moreau, J. Boschker, S. Selbach, R. Holmestad y T. Tybell, «Structural phases driven by oxygen vacancies at the $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{SrTiO}_3$ heterointerface,» *Applied Physics Letters*, p. 041604, 2015.
- [33] S. Diez, «Magnetic and magnetotransport properties of ferro-bilayer $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ / antiferro $\text{La}_{1/3}\text{Ca}_{2/3}\text{MnO}_3$,» Universidad del Valle, Cali, 2012.
- [34] X. Z. Z. C. C. Zhu, Y. Shen, K. Tsukamoto, T. Yanagisawa, M. Okutomi y N. Higuchi, «Hysteresis and vertical anisotropy of magnetoresistance in $\text{La}_{0.67}\text{A}_{0.33}\text{MnO}_z$ (A=Ca, Sr) polycrystalline films deposited on amorphous quartz substrates,» 2013.
- [35] J. Ordoñez, M. Gomez, W. Lopera y P. Prieto, «Enhanced electric and magnetic properties in LCMO/BTO bilayer deposited by Pulsed Laser Deposition,» *Journal of Physics: Conference Series* 480 , p. 012031, 2014.
- [36] E. Vlahova, K. Nenkova, T. Donchevd y A. Spasov, «Influence of misfit stress on the structure and magnetoresistive properties of magnetron sputtered $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ thin films on $\text{LaAlO}_3(1\ 0\ 0)$ substrate,» *Vacuum* 69 , p. 255–259, 2003.
- [37] T. Hickmott, *J. Appl. Phys* 33, p. 2669, 1962.
- [38] A. Asamitsu, Y. Tomioka, H. Kuwahara y Y. Tokura, «Current switching of resistive states in magnetoresistive manganites,» *Nature*, 50, p. 388, 1997.
- [39] A. Sawa, «Resistive switching in transition metal oxides,» *materialstoday*, 2008.
- [40] R. Waser y M. Aono, «Nanoionics-based resistive switching memories,» *Nature Materials* 6, pp. 833-840, 2007.
- [41] A. Sharoni, R. JG y I. Schuller, «Multiple avalanches across the metal-insulator transition of vanadium oxide nanoscaled junctions,» *Phys. Rev. Lett* 101, p. 026404, 2008.

- [42] I. Arango, J. Ordoñez, M. Gomez, A. Avila, S. Arévalo, W. Lopera and P. Prieto, " $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ from bulk to nanostructure," *Workshop on oxide materiales - and - IV congreso de ingeniera fisica*, 2014.
- [43] P. Moonen, B. Vratzov, W. Smaal y B. Kjellander, «Flexible thin-film transistors using multistep UV nanoimprint lithography,» *Organic Electronics* 13, p. 3004–3013, 2012.
- [44] G. Campillo, A. Hoffmann, M. Gomez y P. Prieto, «Exchange bias and magnetic structure in modulation-doped manganite superlattices,» *J. Appl. Phys.* 97, 10K , p. 105 , 2005.
- [45] W. W. Zhuang, W. Pan, B. Ulrich, J. Lee, L. Stecker, A. Burmaster, D. Evans, H. S.T, M. Tajiri, A. Shimaoka, K. Inoue, T. Naka, N. Awaya, K. Sakiyama, Y. Wang, S. Liu and N. Wu, "Novel Colossal Magnetoresistive Thin Film Nonvolatile Resistance Random Access Memory (RRAM)," *IEDM*, pp. 193-196, 2002.
- [46] I. G. Baek, M. Lee, S. Seo, M. Lee, D. Seo, D. Suh, J. Park, S. Park, H. Kim, I. Yoo, U. I. Chung and I. Moon, "Highly Scalable Non-volatile Resistive Memory using Simple Binary Oxide Driven by Asymmetric Unipolar Voltage Pulses," *IEDM*, pp. 587-590, 2004.
- [47] r. Potember, A. Poehler and D. Cowan, "Electrical switching and memory phenomena in Cu-TCNQ thin films," *Appl. Phys.* , p. 405, 1979.
- [48] R. Müller, R. Naulaerts, J. Billen, J. Genoe y P. Heremans, «CuTCNQ resistive nonvolatile memories with a noble metal bottom electrode,» *Appl. Phys.*, p. 063503, 2007.
- [49] L. Ma, S. Pyo, J. Ouyang, Q. Xu y Y. Yang, «Nonvolatile electrical bistability of organic/metal-nanocluster/organic system,» *Appl. Phys.* , p. 1419, 2003.
- [50] T. Hickmott, «Low-Frequency Negative Resistance in Thin Anodic Oxide Films,» *J. Appl. . Phys* 33 , p. 2669, 1962.
- [51] J. Simmons and R. Verderber, "New Conduction and Reversible Memory Phenomena in Thin Insulating Films," *Proc. R. Soc. Londres*, p. 301, 1997.

- [52] J. Gibbons and W. Beadle, "Switching properties of thin Nio films," *Solid State Electronics*, pp. 785-790, 1964.
- [53] A. Sawa, "Resistive switching in transition metal oxides," *MaterialsToday*, pp. 28-36, 2008.
- [54] F. Wong, T. Sriram, B. Smith y S. Ramanathan, «Bipolar resistive switching in room temperature grown disordered vanadium oxide thin-film devices,» *Solid-State Electronics* 87, pp. 21-26, 2013.
- [55] J. Ramírez, T. Saerbeck, S. Wang, j. Trastoy, M. Malnou, J. Lesueur, J.-P. Crocombette, J. E. Villegas and I. K. Schuller.
- [56] m. Gomez, J. Santamaria, M. Cyrille, E. Nelson, K. Krishnan y I. Schuller, «Quantitative roughness of sputtered Fe-Cr superlattices,» *Eur. Phys. J. B* 30, pp. 17-23, 2002.
- [57] J. Santamaria, M. Gómez, J. Vicent, K. Krishnan y I. Schuller, «Scaling of the Interface Roughness in Fe-Cr Superlattices: Self-Affine versus Non-Self-Affine,» *Phys. Rev. Lett.* 89, p. 190601 , 2002.
- [58] J. Ramirez, *Phys. Rev. B* 79 (1), pp. 1-7, 2009.
- [59] M. Gómez, J. Santamaria, S. Kim, M. Kannan, M. Krishnan y I. Schuller, «Detailed structural analysis of epitaxial MBE-grown Fe/Cr superlattices by x-ray diffraction and transmission-electron spectroscopy,» *Phys. Rev. B*, 71, p. 125410, 2005.