



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S.C.  
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**Estudio de la evolución del comportamiento magnético dependiente  
del espesor en películas de  $Mn_3Ga$  elaboradas mediante erosión  
catódica**

**TESIS QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN NANOTECNOLOGÍA**

**Ing. Gonzalo Guízar Martínez  
Ing. Carlos Alberto Partida Carvajal  
Ing. Héctor Ulises Cabrera Villaseñor**

**DIRECTOR DE TESIS:  
Dr. Sion Federico Olive Méndez**

**CHIHUAHUA, CHIH.**

**ABRIL, 2014**

## RESUMEN

El desarrollo de la tecnología constata abarca diferentes rubros, desde el área alimenticia, textil, aeronáutica y microelectrónica, por lo que, para poder desarrollar nuevos dispositivos es necesario recurrir a la unión de materiales químicos que permitan un avance en estos diferentes campos. Actualmente para alcanzar tales objetivos es necesaria la aplicación de la Nanociencia y Nanotecnología, que esta última, tienen como finalidad estudiar, diseñar y fabricar nuevas aplicaciones prácticas. Tomando estos preceptos, se hace una extrapolación hacia el área de la microelectrónica, con la finalidad y propósito de este proyecto de encontrar mejoras en el almacenamiento de información por medio de dispositivos magnéticos, por lo que, el presente trabajo tiene como objetivo elaborar películas delgadas de  $Mn_3Ga$  sobre un sustrato de  $SiO_2/Si(001)$  con diferentes espesores, así como, identificar la composición química, fases cristalinas presentes en el material, evolución morfológica y saturación en magnetización para su posterior aplicación en memorias magnéticas.

Para la elaboración de las películas delgadas, se utilizó la técnica de erosión catódica también conocida como *Sputtering*, determinando los parámetros adecuados para su crecimiento en el sustrato, como lo son la presión de trabajo, temperatura y potencia suministrada al magnetrón. Así mismo, se controlaron los niveles de gas Argón (Ar) para la generación del plasma, permitiendo que el blanco (target) colocado en el magnetrón se lleve a cabo el crecimiento del  $Mn_3Ga$  sobre el sustrato de  $SiO_2/Si(001)$ . Por medio de ésta técnica, se realizaron muestras con espesores de 2, 5, 10 y 50 nm.

Las películas delgadas fueron analizadas por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)<sup>1</sup>, Microscopía de Fuerza Atómica (AFM)<sup>2</sup> y Difracción de Rayos X (XRD)<sup>3</sup>, lo que permitió determinar las morfologías y estructuras cristalinas en cada uno de los espesores de las muestras.

Al aplicar magnetización sobre las películas se estudió la evolución en la orientación de los espines del material de Mn<sub>3</sub>Ga depositado sobre el sustrato, dando como resultado en el experimento un crecimiento tetragonal en películas con espesores menores a 10 nm y hexagonal para espesores mayores a esa cantidad, a su vez, se determinó que la película de 50nm muestra una componente ferrimagnética atrapada en otra antiferromagnética, mostrando una menor capacidad magnética.

<sup>1</sup> Acrónimo de Scanning Electron Microscope por sus siglas en inglés

<sup>2</sup> Acrónimo de Atomic Force Microscopy por sus siglas en inglés

<sup>3</sup> Acrónimo de X-Ray Diffraction por sus siglas en inglés

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Representación esquemática de la TMJ: (a) polarización paralela con magnetorresistencia baja; (b) polarización antiparalela con magnetorresistencia alta. ....	11
Figura 2 Esquema del modelo de Jullière.....	12
Figura 3 Tabla comparativa entre distintos tipos de memoria. ....	14
Figura 4 Representación esquemática de la arquitectura de la MRAM, en cada intersección de las líneas se tienen un UTM. ....	15
Figura 5 Representación esquemática de válvula de espín: (a) polarización paralela con baja magnetorresistencia; (b) polarización antiparalela con alta magnetorresistencia. ....	17
Figura 6 Diagrama de STT: en (a) como la polarización coincide con el espín de los electrones se mantiene, mientras que en (b) la polarización, con el tiempo, cambia. ....	20
Figura 7 Orientación de momentos magnéticos en un material ferrimagnético. ....	22
Figura 8 Dominios magnéticos del Fe: en (a) sin aplicación de campo magnético; en (b) bajo un de campo magnético aplicado.....	22
Figura 9 Diagrama del Mn <sub>3</sub> Ga (fase tetragonal). ....	23
Figura 10 Sustrato de SiO <sub>2</sub> /Si(001) en etanol en baño de ultrasonido. ....	24
Figura 11 Equipo de ultrasonido utilizado para preparación de muestras. ....	25
Figura 12 Sustrato de SiO <sub>2</sub> /Si(001) colocado e inmovilizado en el porta-muestras del equipo sputtering. ....	25
Figura 13 Esquema que explica el sistema Sputtering ....	27
Figura 14 Esquema del bombardeo en un equipo sputtering.....	28
Figura 15 Equipo sputtering ORION V5 OTC de AJA INTERNARIONAL, INC. ....	32
Figura 16 Target de Ma <sub>3</sub> Ga desarrollado en CIMAV.....	34
Figura 17 Magnetrón de equipo sputtering. ....	35
Figura 18 Funcionamiento general del magnetrón. ....	36
Figura 19 Partes del equipo sputtering.....	37
Figura 20 Material Ma <sub>3</sub> Ga sobre el target dentro de la cámara de crecimiento.....	37
Figura 21 Pre-cámara de la máquina de Sputtering. ....	38
Figura 22 Sustrato de SiO <sub>2</sub> /Si(001) sobre el porta objetos de la pre-cámara. ....	38
Figura 23 parte interna de la pre-cámara de Sputtering con el porta objetos. ....	39
Figura 24 El ajustador de la válvula que separa la cámara de crecimiento de la pre-cámara.....	39
Figura 25 Interruptor que activa la bomba mecánica. ....	40
Figura 26 Bomba mecánica. ....	40
Figura 27 Indicador que muestra la presión de la pre-cámara. ....	40
Figura 28 Brazo de transferencia. ....	41
Figura 29 transferencia de la muestra a través del brazo ....	41
Figura 30 Cámara de crecimiento. ....	41
Figura 31 Manipulador del plato giratorio.....	42
Figura 32 Plato giratorio con el porta muestras sosteniéndolo. ....	42

Figura 33 Control para la transferencia de temperatura.....	43
Figura 34 Control de encendido del plato giratorio. ....	43
Figura 35 Panel que controla el suministro de gases en la cámara de crecimiento.....	44
Figura 36 Sensor iónico. ....	44
Figura 37 Suministro de energía a través de Radio Frecuencia. 2 suministro de energía por medio de Corriente Directa. ....	45
Figura 38 Selector de los magnetrones. ....	45
Figura 39 Plasma generado a partir del suministro de Ar y la fuente de energía. ....	45
Figura 40 Se muestran los valores del sensor iónico.....	46
Figura 41 Esquema del método XRD. ....	47
Figura 42 Ecuación y diagrama de la ley de Bragg.....	48
Figura 43 Equipo DRX utilizado en CIMAV .....	49
Figura 44 Esquema del sistema AFM. ....	50
Figura 45 Equipo AFM utilizado en CIMAV. ....	51
Figura 46 Microscopio Electrónico de Barrido. ....	52
Figura 47 Imagen obtenida a través de microscopía SEM de alta resolución.....	53
Figura 48 Imagen obtenida por electrones retrodispersados. ....	54
Figura 49 Diagrama a bloques del microscopio electrónico de barrido.....	54
Figura 50 Imagen con espectro EDS. ....	56
Figura 51 Esquema del método EDS.....	56
Figura 52 Espectro EDS de una película de Mn <sub>3</sub> Ga/SiO <sub>2</sub> /Si(001).....	58
Figura 53 Caracterización por XRD de las películas de Mn <sub>3</sub> Ga. ....	59
Figura 54 Difracción de Rayos X de Ma <sub>3</sub> Ga <sup>II</sup> .....	59
Figura 55 Imágenes obtenidas por AFM. ....	60
Figura 56 Medición de grano en película de 5 nm realizada con el software WsxM.....	61
Figura 57 Gráfica de crecimiento de grano. ....	62
Figura 59 Diagrama de XRD que muestra la evolución de las fases a distintos espesores de películas de Mn <sub>3</sub> Ga elaboradas sobre SiO <sub>2</sub> /Si(001) a una temperatura de 300° C. ....	65
Figura 60 Imagen de morfología de superficie de película de Mn <sub>3</sub> Ga obtenida a través AFM. .	66
Figura 61 Películas de Mn <sub>3</sub> Ga sobre sustrato de SiO <sub>2</sub> /(001).....	67
Figura 62 Muestra de 2nm comparadas en el campo paralelo y perpendicular .....	70
Figura 63 Muestra de 10nm comparadas en el campo paralelo y perpendicular.....	71
Figura 64 Muestra de 2 y 10 nm comparadas en el campo paralelo.....	72
<b>Figura 65 Muestra de 2 y 10 nm comparadas en el campo perpendicular.....</b>	<b>72</b>
Figura 66 Gráfica de película de 50nm medida en el campo paralelo .....	73
Figura 67 Gráfica de película de 50nm medida en el campo perpendicular.....	74

## Índice

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>III</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. NANOCIENCIA Y NANOTECNOLOGÍA.....	1
1.2. APLICACIONES DE NANOTECNOLOGÍA .....	1
1.3. PELÍCULAS DELGADAS.....	4
<b>2 JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>6</b>
<b>3 HIPÓTESIS.....</b>	<b>9</b>
<b>4 OBJETIVO .....</b>	<b>9</b>
<b>5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>11</b>
5.1. UNIÓN TÚNEL MAGNÉTICA (TMJ).....	11
5.2. MEMORIA DE ACCESO ALEATORIO MAGNÉTICA (MRAM) .....	14
5.3. VÁLVULA DE ESPÍN .....	16
5.4. TORSIÓN POR TRANSFERENCIA DE ESPÍN .....	19
5.5. FERRIMAGNETISMO.....	21
5.6. PROPIEDADES DEL $Mn_3Ga$ .....	23
<b>6. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>24</b>
6.1. ELABORACIÓN DE LAS PELÍCULAS DE $Mn_3Ga$ .....	24
6.1.1. Preparación del sustrato de $SiO_2/Si(001)$ .....	24
6.1.2. Crecimiento por erosión catódica (sputtering). .....	26
6.2. CONFIGURACIÓN BÁSICA DE UN SISTEMA DE SPUTTERING .....	31
6.2.1. Detalles técnicos del sistema de sputtering .....	31
6.2.2. Alimentación del electrodo con DCV del sputtering .....	32
6.2.3. Blanco (Target) .....	33
6.2.4. Magnetron sputtering .....	34
6.3. PROCESO DE CRECIMIENTO DE $Mn_3Ga$ A TRAVÉS DE LA TÉCNICA DE SPUTTERING. ....	36
<b>7. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN EMPLEADAS .....</b>	<b>47</b>
7.1. DIFRACCIÓN DE RAYOS X (XRD) .....	47
7.2. MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA (AFM) .....	49
7.3. MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM).....	51
7.4. ESPECTROSCOPIA DE ENERGÍA DISPERSA DE RAYOS X (EDS) .....	55
<b>8. RESULTADOS .....</b>	<b>57</b>
<b>9. CONCLUSIONES.....</b>	<b>75</b>
<b>10. REFERENCIAS.....</b>	<b>76</b>

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1. Nanociencia y Nanotecnología

Actualmente la Nanociencia y Nanotecnología están relacionadas con el estudio de materiales a dimensiones menores a 100 nanómetros, a esta escala se obtienen nuevas propiedades y fenómenos que proporcionan beneficios para el desarrollo y producción de nuevas tecnologías.

A nivel Internacional la Ciencia y la Tecnología de las nanoestructuras es más difundido cada día en muchos países de Norteamérica, Europa, Asia y América Latina, con el fin de desarrollar esta área de la ciencia centros de investigación están dedicadas al estudio y comportamiento de los materiales nanométricos.

Se ha expuesto que la mayoría de las aplicaciones de la Nanotecnología se dirige hacia la microelectrónica, informática, comunicaciones, sistemas militares, medicina y el medio ambiente, aun así sus efectos pueden apreciarse en dispositivo móviles y automóviles.

Las razones del estudio de las estructuras a escala nanométrica es la posibilidad de controlar las propiedades fundamentales de los materiales tal es el caso de la microelectrónica.

Las nanoestructuras en sistemas tan pequeños pueden ser usados para construir dispositivos que contengan una mayor densidad de componentes en comparación con los dispositivos micrométricos; controlando las interacciones y la complejidad de las nanoestructuras pueden lograrse nuevos conceptos de dispositivos electrónicos, circuitos más pequeños y más rápidos, funciones más sofisticadas. [i]

## 1.2. Aplicaciones de Nanotecnología

Las aplicaciones de la Nanotecnología son diversas. Los científicos de diferentes áreas que participan en las investigaciones y progresos de la Nanotecnología han desarrollado nuevos métodos para la fabricación de plásticos, cerámicas, semiconductores, metales, vidrios y otros materiales.

Se pueden mencionar una gran cantidad de aplicaciones, entre las que sobresalen las siguientes: Energías alternativas, administración de medicamentos, medio ambiente, aplicaciones industriales diversas (tejidos, deportes, materiales, automóviles, cosméticos, pinturas, construcción, etc.) y Microelectrónica (semiconductores, nuevos chips).

Para las energías alternativas, se pueden incluir, entre un gran número de aplicaciones, el desarrollo de nuevas celdas solares es un claro ejemplo de la incursión de materiales nanoestructurados, las cuales tienen mayor eficiencia en la conversión fotovoltaica y otras características de interesante utilidad.

En materia de salud, la Nanotecnología ha permitido un gran número de avances, siendo uno de ellos la administración de medicamentos, como el caso de las cápsulas que navegan por la sangre y que son manipuladas controladamente a la zona dañada. Otras aplicaciones comprenden nanodiagnóstico, nanobiosensores, nanomedicina regenerativa, por mencionar algunas.

No menos importante es el rubro medioambientalista, el uso de novedosos nanomateriales, propician la reducción del consumo de materia prima y de energía. Se desarrollan nuevas sustancias con menor daño al medio ambiente como los fertilizantes y los plaguicidas que disminuyan, incluso eviten, el daño a los cultivos y al medio ambiente, en general. [2]



En el ámbito industrial, se tiene una amplia gama de productos, características y métodos que son útiles debido a las ventajas presentadas ante las tecnologías convencionales. Resistencia, ligereza, repelencia (al agua, suciedad, microbios), auto-limpieza u otras superioridades existentes en los materiales nanoestructurado, hacen de la Nanotecnología industrial, un importante sector para la innovación y la investigación.

Mientras tanto, la Microelectrónica, se ha convertido en una rama de la Electrónica, que se apoya en la Física, Química, Ciencia de los materiales y Nanotecnología, para el desarrollo de nuevo materiales semiconductores y circuitos de alta densidad de integración, lo que conlleva a nuevos dispositivos con sorprendentes funciones y aplicaciones, con técnicas cada vez más eficaces y de diversa utilidad. La experimentación e implementación de técnicas y materiales de nueva generación, incluye procesos como crecimiento de cristal, crecimiento de película, oxidación, litografía, grabado, impurificación y metalización.

La Microelectrónica permite, a su vez, el desarrollo de áreas como las siguientes:

- Componentes electrónicos
- Electrónica de consumo
- Telecomunicaciones
- Comunicaciones para la defensa
- Ordenadores y periféricos
- Electrónica industrial
- Electrónica médica. [3]

## Técnicas de crecimiento

Epitaxia por Haces Moleculares (Molecular Beam Epitaxy)      PLD (Pulsed Laser Deposition)

Spray Pirólisis      Evaporación Libre

Sol-Gel

### 1.3 Películas delgadas

Las aplicaciones mencionadas en el apartado anterior son necesarias para su construcción, el apilamiento de láminas delgadas de materiales sólidos por lo que se le llama películas delgadas o capas finas que van desde unos nanómetros hasta algunas micras de espesor. Por tal motivo, estas láminas no se suelen emplear de forma aislada, sino que, éstas deberán ser soportadas sobre otro sólido de mayor grosor de diferentes propiedades físicas o químicas que llevan por nombre sustrato.

Se tienen dos finalidades por las cuales se pueden utilizar las películas delgadas, donde se destaca la optimización de las propiedades de los sustratos o inclusive proporcionar de nuevas propiedades, por lo que, para este fin a las películas delgadas se le suele llamar “*recubrimientos*”. En segundo término a través de éstas se pueden generar dispositivos con propiedades físico-químicas específicas, en el que no se tendría relación estrecha con las propiedades iniciales del sustrato y que sólo fungiría como soporte del mismo material a depositar. Para estas aplicaciones se tendrá que realizar a través de un sistema multicapas de forma estratificada.

Para que se pueda realizar dicho cometido es necesario que cumplan las siguientes características:

Estructura cristalina en la que podrá ser amorfa, cristalina, poli cristalina, tamaño del cristal, orientación y textura.

#### **Propiedades de la superficie**

- Rugosidad
- conductividad eléctrica, reflectividad, entre otras
- No debe tener interacción con la atmósfera
- Uniformidad
- Continuidad.

### **Propiedades de volumen**

- Adherencia.
- Composición y estructura cristalina
- Espesor
- Propiedades específicas como: eléctricas, mecánicas, ópticas entre otras.

### **Propiedades de la intercara**

- Adherencia
- Interdifusión
- Ausencia de Tensiones.

## 2 Justificación

La síntesis y caracterización de nuevos materiales ha dado lugar al descubrimiento de nuevas e interesantes propiedades que han impulsado a nuevas áreas de desarrollo tecnológico. Para el actual trabajo, en el cual se desarrolla la elaboración y análisis de películas delgadas de  $Mn_3Ga$  sobre sustrato de  $SiO_2/Si(001)$ , se enfoca principalmente en el estudio de la evolución del comportamiento magnético que dicho material presenta a diferentes espesores de escala nanométrica.

La MRAM ha estado en desarrollo desde los años 90. La técnica más sencilla que se usó para la conmutación de estados (escritura de datos) fue la generación de los campos magnéticos por medio de corrientes eléctricas significativamente altas, lo que implica una limitante, debido a que no es aplicable a dispositivos de bajo consumo de energía. Otra limitante dada por este método era que para chips de dimensiones escaladas, el campo magnético generado podía afectar a celdas cercanas.

Para solucionar la problemática provocada con la técnica de corrientes para la escritura de datos, se ha incorporado la técnica de torsión por transferencia de espín (STT, por sus siglas en inglés). Ésta consiste de inyectar electrones polarizados, es decir, con los momentos de espín alineados y de esta forma realizar la torsión sobre los dominios, con esto, se utiliza la propiedad del espín y no la carga eléctrica como en los dispositivos convencionales, además permitirá sustituir a las válvulas de espín las cuales constan de varias películas para su funcionamiento. Por lo tanto, se reduce la magnitud de la corriente que genera el campo, lo que representa bajos consumos de energía, además, de que el campo magnético generado no afecte a celdas cercanas a la que está siendo conmutada. Por corolario, se tendría un mejoramiento respecto a la electrónica tradicional en memorias para el almacenamiento de información dado a que se tendrían las características de

que la información no se perdería al dejar de suministrar la fuente de energía que lo alimenta, para su funcionamiento tendría un bajo consumo de energía, una elevada densidad de integración y una alta velocidad tanto en lectura como en escritura.

El  $Mn_3Ga$  es un material que muestra importantes aplicaciones en áreas recientemente desarrolladas, como el caso de la espintrónica, rama de la electrónica basada en la explotación de dos propiedades del electrón de manera simultánea, la carga eléctrica y el espín, para la fabricación de nuevos dispositivos, superando las características de los materiales semiconductores convencionales. En este trabajo se describe la metodología experimental para la elaboración de películas delgadas con los materiales antes mencionados que pueden ser de utilidad para el desarrollo, a nivel laboratorio, de dispositivos espintrónicos, como las memorias magnéticas de acceso aleatorio o *MRAM* (por sus siglas en inglés), que agilizan el procesamiento de datos y pueden almacenarse sin necesidad de energía eléctrica por largos periodos, 20 años o más, considerada información no volátil, como el caso de los dispositivos fabricados y comercializados por *Everspin Technologies*, de acuerdo a la información dada en su página <http://www.everspin.com/>.

Las propiedades magnéticas en dispositivos electrónicos han cobrado mayor relevancia en los últimos años debido a las aplicaciones que se les han dado. El descubrimiento de la magnetorresistencia gigante para las válvulas de espín, por ejemplo, impulsó el desarrollo de distintos dispositivos para el procesamiento de datos como discos duros. En estos dispositivos es posible manipular el espín del electrón y detectar corrientes polarizadas. Modificar la coercitividad magnética de los materiales utilizados para la elaboración de dispositivos espintrónicos se convierte en una de las piezas fundamentales para que dichos materiales puedan ser explotados de una manera más eficiente.

Por lo tanto, conocer las propiedades magnéticas de las películas delgadas de  $\text{Mn}_3\text{Ga}$  a distintos espesores es de utilidad para realizar pruebas experimentales en dispositivos en los que la manipulación del espín del electrón represente ventajas, para el procesamiento y el almacenamiento de información, como el caso de las MRAM.

### **3 Hipótesis**

Al modificar el espesor de las películas delgadas de Mn<sub>3</sub>Ga, sintetizadas por sputtering sobre sustratos de SiO<sub>2</sub>/Si(001), se espera un cambio en las propiedades magnéticas:

Para espesores muy pequeños debido a confinamiento cuántico.

Para espesores mayores debido a un cambio en la energía libre de superficie del material donde nuclea el compuesto Mn<sub>3</sub>Ga.

Con materiales de menor espesor a 10nm se espera la nucleación de la fase tetragonal y para mayores a esa cantidad se espera una nucleación Hexagonal.

### **4 Objetivo**

Elaborar películas de Mn<sub>3</sub>Ga, sobre sustratos de SiO<sub>2</sub>/Si(001) con diferentes espesores mediante la técnica de erosión catódica e identificar el comportamiento magnético de las películas dependiente del espesor.

#### **4.1. Objetivos específicos**

1. Elaborar películas de Mn<sub>3</sub>Ga sobre sustratos de SiO<sub>2</sub>/Si(001) mediante la técnica de erosión catódica (sputtering) con espesores de 2, 10 y 50 nm
2. Identificar la composición química de las películas mediante energía dispersa de rayos X (EDS)
3. Identificar las fases presentes en dichas películas mediante difracción de rayos X (XRD)
4. Evaluar la evolución de la morfología de la superficie mediante microscopía de fuerza atómica (AFM)

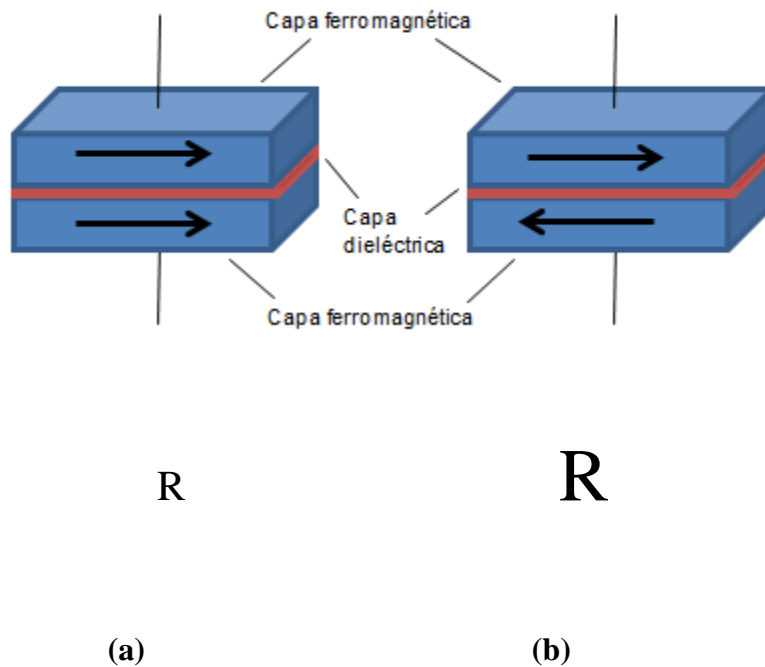


5. Realizar mediciones magnéticas con el campo magnético del magnetómetro aplicado paralelo y perpendicular al plano de la muestra.

## 5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 5.1. Unión túnel magnética (TMJ).

Uno de los fenómenos más importantes en el campo de la Espintrónica es el que presenta la *unión túnel magnética (TMJ)*, por sus siglas en inglés) conocido como *magnetorresistencia túnel (TMR)*, por sus sigla en inglés). El descubrimiento de este efecto es atribuido a M. Jullière en 1975 empleando temperaturas muy bajas, del orden de 4.2 K. En 1994 Miyazaki y J. Moodera obtuvieron resultados interesantes del efecto a temperatura ambiente. [4]



**Figura 1** Representación esquemática de la TMJ: (a) polarización paralela con magnetorresistencia baja; (b) polarización antiparalela con magnetorresistencia alta.

La TMJ está constituida por dos materiales ferromagnéticos y una capa intermedia de material aislante, todos estos a escala nanométrica, formando una especie de “sándwich”. Los materiales magnéticos se utilizan como electrodos, mientras que la delgada capa de material aislante,

colocada entre los materiales magnéticos, funciona como una *barrera túnel* por la cual se hace pasar corriente eléctrica por medio del efecto túnel cuando una diferencia de potencial es aplicada entre las capas magnéticas. La importancia de esta estructura radica en el control de la TMR, incrementándola o reduciéndola, de tal manera que se regula el paso de la corriente eléctrica que habrá de atravesar por la barrera túnel [5]. Véase en la Figura 1 una representación esquemática de una TMJ.

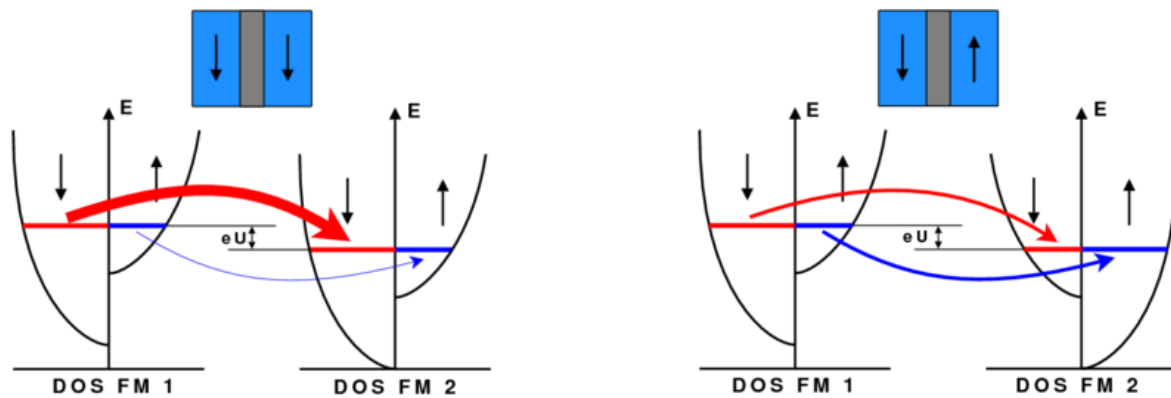


Figura 2 Esquema del modelo de Jullière.

En la Figura 2 se muestra un esquema del modelo de Jullière, donde se representan las corrientes polarizadas en espín para dos capas ferromagnéticas separadas por un material aislante. Cuando la mayoría de los espines de los electrones coinciden, entre una capa ferromagnética y la otra, la corriente circula pues la TMR es baja. Sin embargo, cuando la polarización es antiparalela la TMR aumenta impidiendo que circule la corriente.

Para el primer diagrama mostrado en la Figura 2, la capa ferromagnética 1 (FM 1), la mayoría de los electrones poseen spin-down y en la capa ferromagnética 2 (FM 2) hay suficiente capacidad para acoger a dichos electrones con la misma orientación, mientras que los pocos electrones con spin-up no poseen la capacidad de transferencia de la capa FM 1 ni la capacidad de acoger en la

capa FM 2. Para el segundo diagrama, aunque la mayoría de los electrones de la capa FM 1 son spin-down, en la capa FM 2 no se tiene la capacidad de acogerlos, mientras que los electrones spin-up son la minoría por lo que no pasan a la capa FM 2, a pesar de la gran capacidad de albergar que posee.

Por lo tanto, para el primer diagrama, la TMR es baja, caso contrario del segundo diagrama, donde la TMR es muy alta.

Para controlar la magnitud de la TMR se aplican campos magnéticos que manipulan la polaridad de los electrodos. Los campos magnéticos permiten controlar, en uno de los electrodos, su polaridad, cambiando con respecto del otro electrodo, de una polaridad magnética paralela a antiparalela y viceversa. Así, al cambiar las polaridades entre los electrodos, cuando las polaridades son paralelas, la TMR es pequeña y muy grande cuando las polaridades de los electrodos son antiparalelas. Este fenómeno, producido en una TMJ se le conoce como TMR. La variación de la TMR en la TMJ que afecta el paso de electrones, del primer al segundo electrodo, depende de la orientación magnética que dichos electrodos poseen. Cuando la polarización magnética es paralela, la orientación de los espines de los electrones (que se encuentran alineados) permite que su paso a través de la capa aislante sea relativamente fácil y muy difícil cuando se encuentra en una orientación antiparalela. Por lo que la circulación o la limitación de electrones a través de la barrera túnel permite manipular las corrientes eléctricas que pueden ser traducidas como estados binarios (0 y 1). [6]

Se ha empleado la TMJ para el desarrollo de dispositivos espíntrónicos como cabezas lectoras de discos duros las MRAM, estas últimas presentan características muy importantes para el procesamiento y almacenamiento de datos. [7]

## 5.2. Memoria de acceso aleatorio magnética (MRAM)

Las memorias de acceso aleatorio magnéticas (Magnetic Random Access Memory, *MRAM*) son dispositivos que en la actualidad se encuentran en investigación y en desarrollo y que posteriormente dominará el mercado de los dispositivos electrónicos.

Las ventajas que las memorias MRAM pueden proveer superan, por mucho, a las funcionalidades de otros tipos de memorias, como las de tecnologías DRAM, SDRAM y Flash. En la Figura 3 se muestra una comparación de distintas características entre las memorias mencionadas, donde son evidentes las ventajas de la MRAM sobre las otras. [8]

La memoria RAM posee como principal desventaja la propiedad de ser volátil, es decir, una vez que el equipo es apagado o desenergizado, la información es borrada. Cuando el equipo se enciende de nuevo, se debe esperar a que se vuelva a cargar el sistema operativo y las aplicaciones instaladas, lo que implica pérdida de tiempo al ejecutar las tareas deseadas.

	SRAM	DRAM	FLASH	MRAM
Velocidad de lectura	rápida	media	media	rápida
Velocidad de escritura	rápida	media	lenta	rápida
Densidad de integración	baja	alta	alta	alta
Consumo de energía	alto	medio	bajo	bajo
No volátil	no	no	si	si

Figura 3 Tabla comparativa entre distintos tipos de memoria.

La memoria RAM basa la conservación de información en el almacenamiento de carga eléctrica en los diminutos capacitores que posee, mismos que deben estarse refrescando (energizando) constantemente, a fin de no perder los datos. Pero, como se menciona, una vez que en el equipo de cómputo cesa la alimentación de energía, la información en la memoria RAM desaparece. [9]

Los datos que se procesan y almacenan en las computadoras poseen distintas características, por lo que la memoria RAM no se puede encargar del manejo de toda la información por igual, por lo que se deben incluir otros tipos de dispositivos de memoria.

Una vez que se desarrollen y comercialicen las memorias MRAM, éstas llegarán a sustituir a todo el conjunto de memorias que se incluyen en las computadoras y otros dispositivos electrónicos que almacenan y procesan información, a lo que denominan como *memoria universal*. Por lo tanto, el estudio y construcción de nuevos materiales se ha convertido en un área del ámbito tecnológico de gran relevancia. [10]



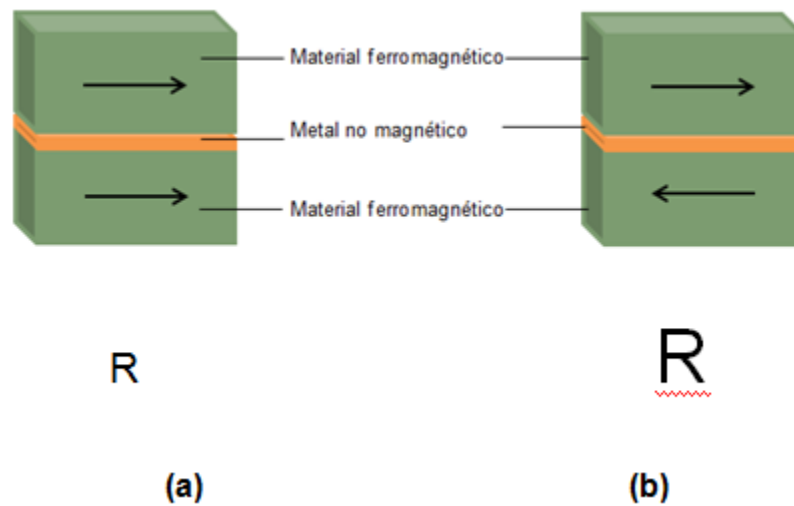
**Figura 4** Representación esquemática de la arquitectura de la MRAM, en cada intersección de las líneas se tienen un UTM.

La arquitectura de una MRAM consiste, principalmente, de una matriz de líneas conductoras (filas y columnas) donde cada unión (celda) formada contiene una TMJ. La Figura 4 esquematiza un arreglo que representa la arquitectura fundamental de una MRAM.

Para el funcionamiento de una MRAM, se hacen circular corrientes por líneas transversales, de tal manera que converjan en una celda, la suma de estos campos magnéticos será la que defina la orientación de la película libre. A diferencia de otro tipo de memorias, donde los datos almacenados se manejan eléctricamente (placas capacitores en las Flash y un capacitor en las RAM), en la MRAM se genera un campo magnético que polariza los electrodos ferromagnéticos de cada TMJ, en una configuración paralela o antiparalela. Por tanto, como la información no es guardada como carga eléctrica sino como magnetización, no es necesaria la energización constante, como sucede con las memorias RAM. Como se mencionó en el tema anterior, una TMJ cambia la magnitud de la resistencia al paso de corriente de acuerdo a la orientación magnética que tienen en cierto momento los electrodos, siendo la medición de la resistencia, la lectura de los datos. [11]

### **5.3. Válvula de espín**

Otra forma de encontrar y utilizar el efecto de la configuración paralela y antiparalela es en una válvula de espín donde se tiene el fenómeno de magnetorresistencia gigante cuyo descubrimiento fue galardonado en el 2007 con el premio nobel de física otorgado a Albert Fert y Peter Grünbe. [12] En esta estructura, al igual que en la TMJ, existen dos materiales ferromagnéticos de diferentes espesores, donde cada uno de ellos tiene una coercitividad proporcional a su espesor. A los dos materiales ferromagnéticos los separa otro material metálico no magnético como Cu, Rh o Pt (véase la Figura 5). De manera similar al de la TMJ, en una de las capas de material ferromagnético, la de baja coercitividad, puede ser manipulable su polarización. De tal forma que se logre, entre las dos capas ferromagnéticas, una polarización paralela o antiparalela.



**Figura 5** Representación esquemática de válvula de espín: (a) polarización paralela con baja magnetorresistencia; (b) polarización antiparalela con alta magnetorresistencia.

La corriente que circula o se limita entre los electrodos pasa a través de la película metálica no magnética. La diferencia entre la TMJ y la válvula de espín es que, para el caso de la primer estructura, la corriente que circula entre los electrodos debe pasar a través de una barrera túnel (en la película dieléctrica) con la corriente perpendicular al plano de la estructura, mientras que en la segunda estructura la corriente circula por el material conductor de manera paralela al plano de las películas.

La válvula de espín ha tenido aplicaciones desde la década de los años 90, teniendo como principal aplicación en la cabeza de lectura de los discos duros de computadora, lo cual ha permitido incrementar la densidad de almacenamiento en 20 veces utilizando el mismo material con el que se fabrican los discos, sólo cambiando la estructura y mecanismo de funcionamiento



de la cabeza de lectura. La magnetorresistencia gigante de las válvulas de espín también es empleada en algunos sensores magnéticos. [13]

#### **5.4. Torsión por transferencia de espín**

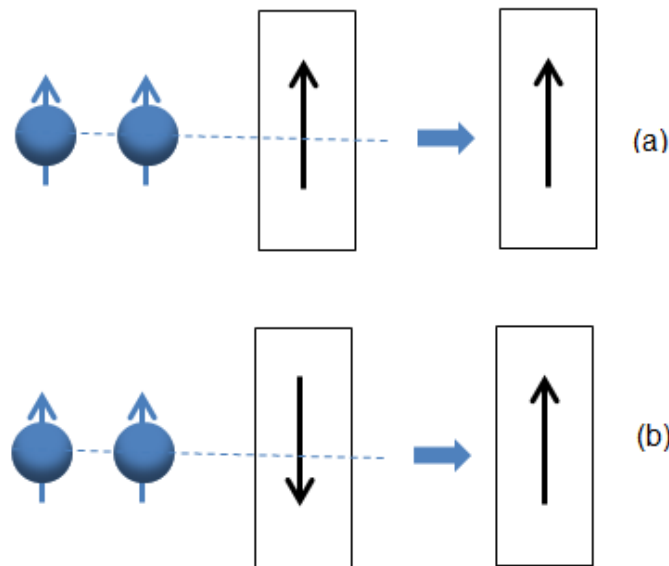
El fenómeno de torsión por transferencia de espín (*STT*, por sus siglas en inglés) se descubrió a finales de los años 1970 y 1980 con Berger [14], donde en dichos estudios comprueban el cambio de orientación magnética de los dominios magnéticos en películas ferromagnéticas, las cuales requerían una gran cantidad de corriente de hasta 45A, y tenían un tamaño en la escala de mm. Actualmente se utilizan nuevas técnicas donde se fabrican películas ferromagnéticas con dimensiones de 100 nm de espesor donde la fuerza de torsión para generar el movimiento de los dominios magnéticos es unos cuantos miliamperios.

En 1996 se predijo que la corriente que fluye en materiales ferromagnéticos, puede generar una transferencia de giro suficientemente fuerte para reorientar la magnetización de las capas de dichos materiales. [15]

Cuando se transfiere el espín se genera una cantidad de movimiento angular no constante, esto sucede cada vez que una corriente de espín creada por el giro de filtrado de una película delgada magnética cuyo momento no es colineal con la primera. En el proceso de filtrado el segundo imán necesariamente absorbe una parte del momento angular de espín debido a los electrones.

Los cambios en el flujo del momento angular del espín se producen cuando los electrones del espín polarizado pasan a través de un campo magnético no uniforme, en este proceso los espines portadores giran para seguir con la magnetización local, el vector del momento angular del espín, cambia en función de su posición. En cualquiera de estos dos casos, la magnetización del material ferromagnético cambia con el flujo del momento angular del espín al ejercer un torque para reorientarlos y por lo tanto los electrones que fluyen deben ejercer un torque igual y opuesto sobre el material ferromagnético. Este torque que se aplica a los electrones en conducción en

materiales ferromagnéticos se le llama transferencia de torsión de espín. [16] La Figura 6 representa la circulación de corriente polarizada en espín, cuando coincide la orientación con la polarización del espín de los electrones, no hay cambio, pero cuando la orientación es distinta, se realiza una conmutación con dicha orientación.



**Figura 6 Diagrama de STT: en (a) como la polarización coincide con el espín de los electrones se mantiene, mientras que en (b) la polarización, con el tiempo, cambia.**

Se emplea STT como una de las técnicas para el almacenamiento magnético de las memorias MRAM y es una de la más reciente, la cual utiliza electrones polarizados para realizar la torsión sobre las orientaciones magnéticas.

## 5.5. Ferrimagnetismo

Se definen ferrimagnéticos a ciertos compuestos que presentan formas complejas de ordenamiento magnético como resultado de la estructura cristalina. La alineación de los momentos puede ser descrita en términos de dos redes ferromagnéticas opuestas y con diferente magnitud cada una. Si la magnetización total de las rejillas es diferente el material es ferrimagnético.

Cuando un material ferrimagnético es colocado en un campo magnético estático lo suficientemente intenso muestra una imanación reforzada en la dirección del campo, siendo la diferencia de dos campos antiparalelos. (Véase la Figura 7). [17]

El hecho de que la muestra de material ferrimagnético está compuesta de pequeñas regiones llamadas dominios magnéticos, la formación de los dominios es que al incrementarse el número de éstos, se reduce la energía almacenada en el campo externo.

Dentro de cada dominio los momentos magnéticos de spin de los electrones son paralelos entre sí; o dicho de otro modo, cada dominio esta imantado hasta la saturación. En el hierro, los sentidos de los campos magnéticos de los dominios son paralelos a uno o a otro de los ejes cristalográficos de la familia  $\langle 100 \rangle$ , sin embargo, en el hierro imantado hay una variación al azar del sentido de un dominio a otro, ya que de manera natural todos los metales son policristalinos con los granos orientados aleatoriamente, esto hablando de una pieza en bulto de modo que el campo magnético resultante de una muestra de tamaño considerablemente grande es nulo.

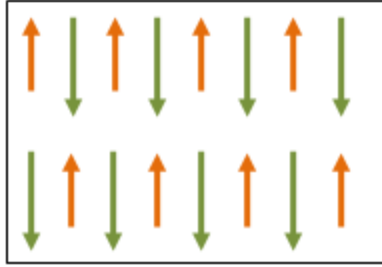


Figura 7 Orientación de momentos magnéticos en un material ferrimagnético.

En los campos débiles, los cambios consisten, primero en rotaciones de los sentidos de imantación de los dominios tendiendo a aproximarse al paralelismo con el campo exterior, y segundo, en el movimiento de los límites de los dominios.

Aquellos dominios para los cuales la imantación es aproximadamente paralela al campo exterior, aumentan de tamaño a expensas de los dominios contiguos, en los cuales la imantación forma ángulos mayores con el campo exterior.

Finalmente en campos intensos la imantación de todos los dominios gira de modo continuo hasta hacerse paralela al campo exterior y toda la muestra se encuentra saturada (véase la Figura 8 para la comparación con un material ferromagnéticas). [18]

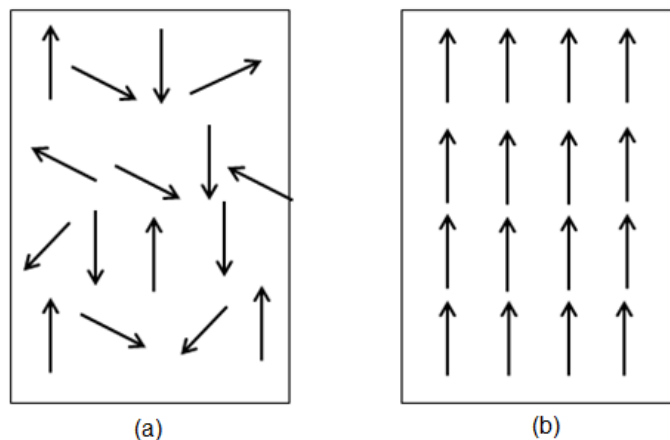


Figura 8 Dominios magnéticos del Fe: en (a) sin aplicación de campo magnético; en (b) bajo un de campo magnético aplicado.

## 5.6. Propiedades del $Mn_3Ga$

Estudios realizados en este material han arrojado importantes propiedades que lo posicionan como uno de los principales materiales en el desarrollo y fabricación de dispositivos del área de la espintrónica. En la Figura 9 se presenta el diagrama del material ( $\tau$ - $Mn_3Ga$ ).

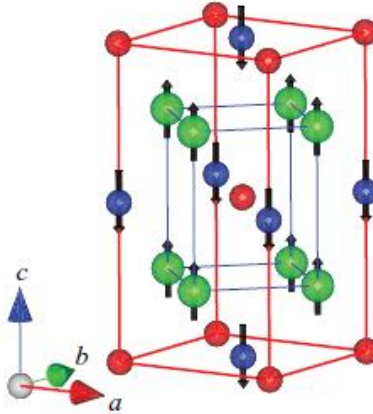


Figura 9 Diagrama del  $Mn_3Ga$  (fase tetragonal).

Las propiedades de este material son:

- Alta constante de anisotropía
- Alta temperatura de Curie (770 K)
- Alta coercitividad magnética
- Baja magnetización.

Los comportamientos del  $Mn_3Ga$  son: para la fase tetragonal como ferrimagnético y para la fase hexagonal como antiferromagnético. De esta manera, el material objeto de este trabajo presenta las peculiares propiedades que permiten desarrollar trabajos en el estudio de la evolución del comportamiento magnético dependiente del espesor y sus importantes aplicaciones en el campo de la espintrónica. [19]

## 6. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 6.1. Elaboración de las películas de $Mn_3Ga$

#### 6.1.1. Preparación del sustrato de $SiO_2/Si(001)$

En este capítulo se presentará la metodología de síntesis de las películas de  $Mn_3Ga$  depositadas sobre sustrato de  $SiO_2/Si(001)$  y las técnicas de caracterización que se emplearon en este trabajo.

Utilizando una punta de diamante se realizaron los cortes en el sustrato de  $SiO_2/Si(001)$ , el cual fue empleado como sustrato para hacer el crecimiento del material estudiado. Para preparar la muestra se llevó a cabo la limpieza de la misma, lavándose con etanol por 10 minutos en un baño de ultrasonido para remover cualquier contaminación orgánica que esté presente en la superficie, seguida de un enjuague con agua desionizada. Véase muestra en etanol y equipo de ultrasonido en las Figura 10 y 11, respectivamente.



Figura 10 Sustrato de  $SiO_2/Si(001)$  en etanol en baño de ultrasonido.



Figura 11 Equipo de ultrasonido utilizado para preparación de muestras.

Una vez que se limpió el sustrato, se procede a su montaje ésta en el porta-muestras del equipo sputtering. En la Figura 12 se observa el sustrato colocado sobre el porta-muestras, inmobilizado para ser colocado en la pre-cámara antes de ser transferido a la cámara de alto vacío.



Figura 12 Sustrato de  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  colocado e inmobilizado en el porta-muestras del equipo sputtering.

### **Crecimiento fase vapor (PVD)**

El crecimiento por fase vapor (*PVD*, por sus siglas en inglés) es una técnica de crecimiento atómica en la que el material es vaporizado desde una fuente sólida en forma de átomos o moléculas, transportado en forma de vapor a través del vacío, gases a baja presión o plasma donde se condensa en torno a un sustrato.

El proceso de PVD consta de tres etapas:



- Evaporación
- Transporte
- Crecimiento.

Evaporación:

Durante esta etapa, el blanco (*target*), que consiste en el material a depositar, es bombardeado por una gran fuente de energía, como lo pueden ser los haces de electrones e iones, estos últimos desalojan los átomos de la superficie del target evaporándolos.

Transporte:

Consiste en el movimiento de los átomos vaporizados desde el target hasta el sustrato que se desea recubrir.

Crecimiento:

Ésta indica el proceso de recubrimiento que crecerá sobre la superficie del sustrato. Dependiendo del proceso que se lleve a cabo, algunas reacciones entre el material del blanco y la reacción de los gases puede se puede generar un proceso de crecimiento de ambos sobre la superficie del sustrato. [20]

### **6.1.2. Crecimiento por erosión catódica (sputtering).**

Este proceso de erosión catódica (*sputtering*, como es conocido en inglés), consiste en la vaporización física (no térmica) de los átomos en una superficie. Por medio de un bombardeo energizado de partículas. La energía de las partículas son generalmente iones de materiales gaseosos acelerados por medio de un campo eléctrico. Por ende, el proceso de sputtering, es el crecimiento de partículas delgadas sobre un material comúnmente llamado sustrato, mediante la creación de un plasma en unión de electrones libres con un gas inerte. El plasma acelera los iones

desde un material origen o fuente, conocido como blanco. Este último es erosionado por medio de los iones que llegan a través de la transferencia emitida por una fuente de energía y son expulsados en forma de partículas neutras, ya sea átomos individuales, grupos de átomos o moléculas. Las partículas neutras que son expulsadas viajarán en línea hacia el sustrato, a menos, que se encuentren con otras partículas cerca de la superficie a cubrir. Por lo que, si en un sustrato como en el caso de una oblea de Silicio (Si) se coloca en el camino de las partículas expulsadas, la oblea será recubierta por una película delgada proveniente del material de origen o blanco. En la Figura 13 se tiene un esquema de esta técnica.

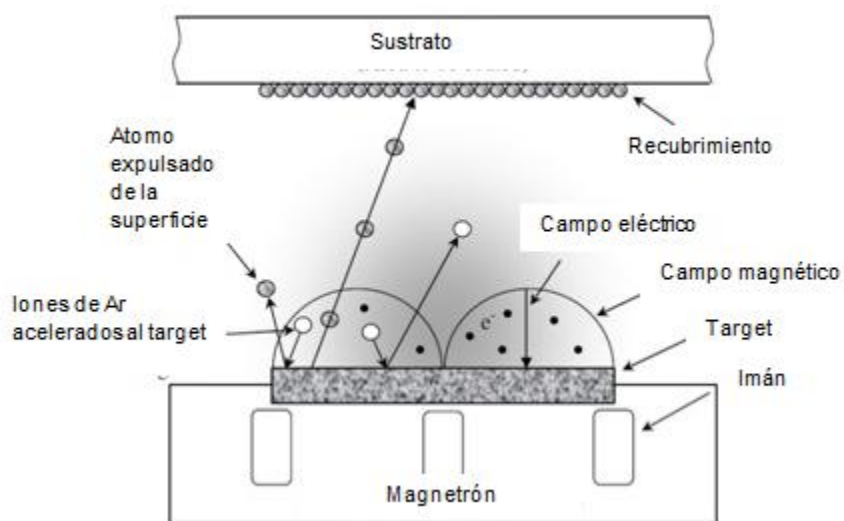


Figura 13 Esquema que explica el sistema Sputtering

Para comprender mejor este proceso de erosión se describirán algunos conceptos relacionados.

Al plasma, algunos lo describen como el cuarto estado de la materia (adicional a los estados sólido, líquido, y gaseoso), por lo que un plasma gaseoso es una condición dinámica, donde los átomos de un gas neutral, iones, electrones y fotones se encuentran cercanos y balanceados simultáneamente, en el que se requerirá una fuente de energía para alimentarla, como lo puede ser radio frecuencia, corriente directa, microonda y, así mantener su estado de plasma. Esto es,

en términos generales acerca del plasma; si a un objeto en estado sólido se le agrega una fuente de energía (calor producto de la combustión, RF, CD o microondas), éste cambia al estado líquido, al seguir aplicando la fuente de energía, se convertirá en gas y por último si a ese gas se le sigue administrando una fuente de energía, de estar en un estado gaseoso pasará a ser un estado de plasma. De esta forma, se genera un nuevo estado de la materia constituido por electrones libres, átomos y moléculas que eléctricamente son neutras e iones que constan de una carga eléctrica positiva o negativa.

Ahora bien, el plasma como parte esenciales en la creación de películas delgadas sobre un sustrato, es posible generarlo y crear una condición dinámica, dosificando un gas inerte como Argón (Ar), empleando una cámara de vacío pre-bombeado y permitiendo que la presión de la cámara alcance los valores necesarios, así como, la introducción de un electrodo conectado a la terminal negativa de la fuente de alimentación.

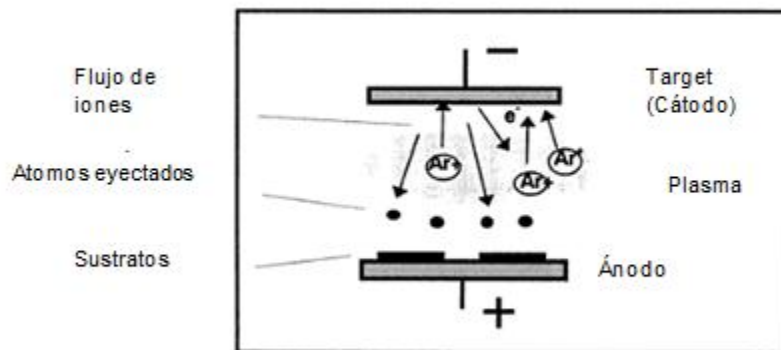


Figura 14 Esquema del bombardeo en un equipo sputtering.

En la Figura 14 se muestra el esquema de una descarga eléctrica en el proceso de sputtering, se puede apreciar, que el electrodo superior que está conectado a la terminal negativa de la fuente de energía, actúa como cátodo de la descarga eléctrica, donde se encuentra el material a evaporar, el cátodo, también es denominado como target en la máquina de sputtering, el cual está

sometido al bombardeo de los iones positivos de la descarga una vez que son acelerados por el plasma, como consecuencia a la caída de potencial asociada a la aplicación del plasma. El bombardeo, además de provocar una erosión del target, provoca la emisión de electrones que son acelerados por el plasma, ya que estos electrones se encuentran dentro del plasma, tienen la capacidad de formar nuevos iones debido al impacto con los átomos del gas, produciendo así un efecto de ionización, de esta forma se compensa la pérdida de carga producida por colisiones de las especies cargadas en las paredes de la cámara de vacío y los electrodos.

Por otra parte, el gas utilizado en la descarga para la generación del recubrimiento por lo general suele ser un gas inerte de masa elevada, con el motivo de aumentar el envío en el movimiento de los átomos del blanco. En el caso del sustrato, con la finalidad de ser recubiertos, son colocados sobre el ánodo.

Ventajas:

- Se obtiene un crecimiento a temperatura baja, es decir, sin necesidad de calentar el blanco, por el contrario, es necesario refrigerar el cátodo para disipar la energía producida por el bombardeo de iones
- Cuenta con una versatilidad para evaporar materiales de diferentes tipos como lo pueden ser metales conductores o aislantes cerámicos
- Permite realizar crecimiento de mezclas y aleaciones manteniendo la composición del blanco
- Se obtiene buena adherencia del crecimiento sobre los sustratos, debido a la energía de los átomos pulverizados pueden alcanzar varias unidades de eV.

### Desventajas:

- En muchas de las configuraciones de sputtering por bombardeo iónico, el patrón de emisión no es uniforme
- La energía producida por el sputtering calienta el blanco por lo que se requiere un sistema de enfriamiento
- Las tasas de vaporación catódica son bajas, en comparación con las que se pueden lograr por vaporación térmica
- Los aisladores de los blanco pueden ser frágiles y se rompen con facilidad debido al calentamiento no uniforme
- El calentamiento del sustrato desde el bombardeo de electrones puede ser alta en algunas configuraciones
- Los sustratos y las películas pueden ser bombardeados por pequeñas longitudes de ondas de radiaciones de alta energía que pueden mermar el rendimiento
- Cuando se utiliza precursores de vapor químico las moléculas pueden disociarse de forma parcial o total en el plasma lo que genera hollín. [21]

## **6.2. Configuración básica de un sistema de sputtering**

Consistente de 300 mm de acero inoxidable, la cámara de vacío está equipada con puertos UHV para acomodar otras fuentes de energía o unidades auxiliares. Cuenta con una fuente de bombardeo confocal que puede ser orientado en ángulos específicos, está equipado con dos fuentes de pulverización de 2" y una de 1", así como dos fuentes de evaporación termal montada dentro de la cámara. Para controlar y calibrar la tasa de crecimiento por pulverización catódica, se utiliza un monitor de espesor de cristal de cuarzo. Además cuenta con una cámara de carga independiente donde se ingresa el sustrato, con la finalidad de no contaminar la cámara principal y el sustrato permite ser calentado hasta los 850°C. En la Figura 15 el equipo sputtering empleado para el desarrollo experimental del presente trabajo.

### **6.2.1. Detalles técnicos del sistema de sputtering**

- Tamaño del sustrato: hasta 4".
- Máxima temperatura del sustrato soportada: 850°C
- Giro del sustrato a motor continuo hasta que va desde los 0 a 20 rpm
- Vacío:  $6.0 \times 10^{-8}$  Torr
- Magnetrones: 2" y un de 1"
- Fuentes de evaporación termal: 2
- Bloqueo de carga de vacío
- Generador de 750 Watts CD
- Generador de 50 Watts de RF para el sustrato
- 2 líneas de flujo de gas controladas por válvulas neumáticas y filtros.



Figura 15 Equipo sputtering ORION V5 OTC de AJA INTERNARIONAL, INC.

### 6.2.2. Alimentación del electrodo con DCV del sputtering

Siempre que se encuentren presentes electrones libres dentro de la cámara de vacío en el proceso de sputtering, serán inmediatamente acelerados lejos del electrodo con carga negativa (cátodo). Estos electrones acelerados se acercarán y colisionarán con los átomos que se encuentren en el camino proporcionado por el gas neutro, es decir, un electrón que se encuentre libre en la cámara de vacío, si se junta con un átomo de gas inerte, ambos se impactarán dando como resultado el desprendimiento del electrón que conforma el gas, por ende, al colisionar ambos electrones impulsarán los átomos del gas dejándolo eléctricamente desequilibrado ya que tendrá una carga global positiva, es decir, dejándolos con más protones que electrones, por lo que, ya no es un átomo de gas neutro sino que se convierte en un ion de carga positiva.

Por otra parte, los iones cargados positivamente, derivado de la colisión entre los electrones y el gas inerte o neutro, se acelerarán hacia el electrodo comúnmente llamado cátodo que está cargado eléctricamente de forma negativa. El ion al ser atraído golpeará la superficie del cátodo

ocasionando una expulsión del material depositado sobre el electrodo, y este a su vez, expulsará más electrones libres a causa de la transferencia de energía, dando como resultado el proceso de erosión catódica. Los electrones libres nuevamente liberados ocasionarán la formación de nuevos iones y la posteriormente el plasma.

Una vez que el material depositado sobre el cátodo es liberado, también expulsa nuevos electrones libres, éstos, buscarán regresar a sus capas de valencia externa, es decir, al encontrarse con los iones de carga positiva en su camino, estos electrones nuevamente se atraerán dando como resultado nuevamente un átomo de gas neutro, por consecuencia también ganará energía que deberá liberar en forma de un fotón. Con este ciclo se cumple con la ley de la conservación de la energía.

### **6.2.3. Blanco (Target)**

Los blancos pueden ser de muchas formas con la finalidad de adaptarse a los accesorios suministrados, o pueden estar hechos conforme a la forma del sustrato. Los blancos pueden ser móviles o protegidos por un “*shutter*” u obturador para permitir la pre-pulverización catódica y así hacer un acondicionamiento en el blanco antes de comenzar el crecimiento de la pulverización catódica. [22]

Las configuraciones más comunes en los blancos de las máquinas de sputtering suelen ser: blanco plano, de cilindro hueco, cónico y cilíndrico giratorio.

Pueden ser utilizados para depositar aleaciones y mezclas de diferentes materiales. La composición de las películas puede variar al cambiar las diferentes relaciones de las áreas. Al utilizar estos tipos de blancos, la presión debe ser baja para que la dispersión no se cruce entre las diferentes áreas. En caso de ocurrir un cruce de áreas del blanco la velocidad de la erosión puede cambiar el recubrimiento de un material al de menor velocidad de pulverización.



El blanco usado se muestra en la Figura 16, el cual fue fabricado en CIMAV por fundición de horno de arco.

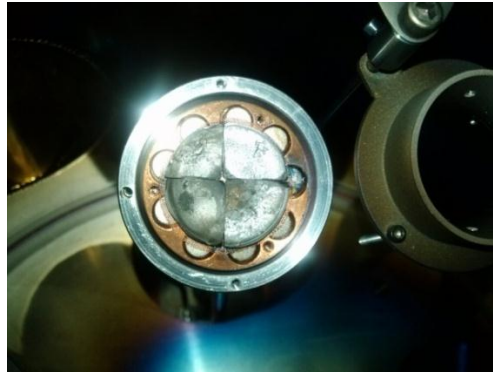


Figura 16 Target de  $\text{Ma}_3\text{Ga}$  desarrollado en CIMAV.

#### 6.2.4. Magnetron sputtering

El diodo sputtering ha demostrado ser una técnica útil en el crecimiento de películas delgadas cuando se le agrega el material a erosionar o pulverizar sobre el cátodo o electrodo. No obstante este sistema consta de dos grandes problemas que se pueden encontrar como lo son: la velocidad de crecimiento es lenta y el bombardeo de electrones del sustrato es extenso y puede causar un sobrecalentamiento por consiguiente, daños estructurales del equipo.

Por lo tanto, el desarrollo del magnetron sputtering surge como solución de ambas problemáticas. Con el uso de imanes detrás de los cátodos para atrapar los electrones libres en un campo magnético directamente por encima del blanco. Los electrones no son libres para bombardear el sustrato que en la misma medida que lo realiza el diodo sputtering. En la Figura 17 se puede observar un magnetron.



**Figura 17** Magnetron de equipo sputtering.

Al mismo tiempo la extensa trayectoria que tiene el electrón cuando están atrapados en el campo magnético aumenta la probabilidad de ionizar una molécula de gas neutro en varias órdenes de magnitud, por consecuencia, el aumento de iones disponibles aumenta significativamente la velocidad a la que el material depositado en el target se erosiona y se deposita en el sustrato. La Figura 18 esquematiza la función general de los magnetrones.

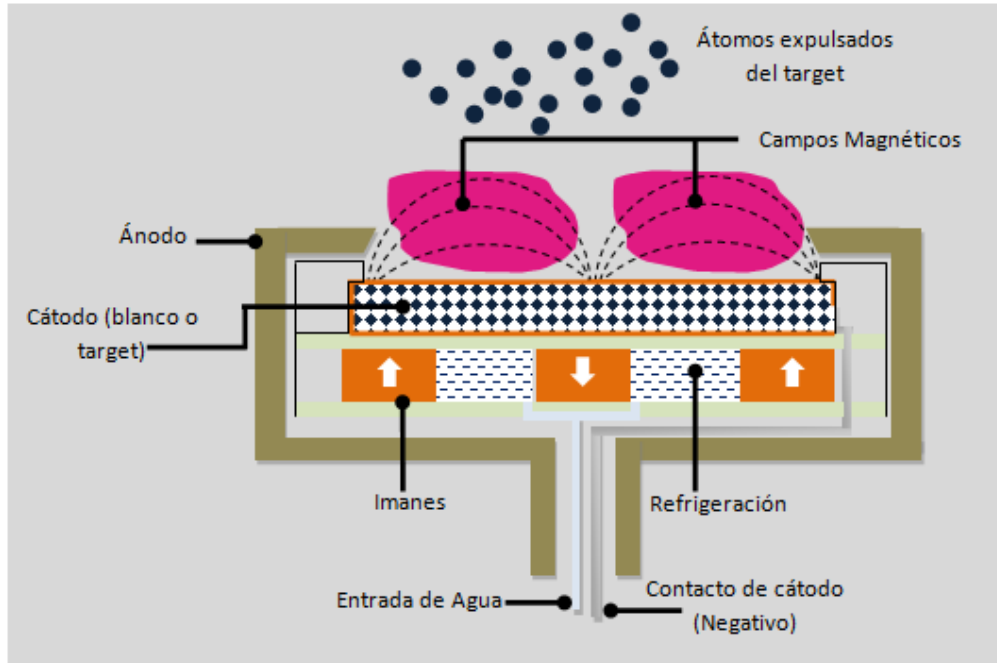


Figura 18 Funcionamiento general del magnetrón.

### 6.3. Proceso de crecimiento de $Mn_3Ga$ a través de la técnica de sputtering.

Para la elaboración de las películas de  $Mn_3Ga$  se utilizó el equipo sputtering ORION V5 OTC de AJA INTERNARIONAL, INC. En la Figura 19 se muestra el equipo utilizado, ubicando sus principales partes.

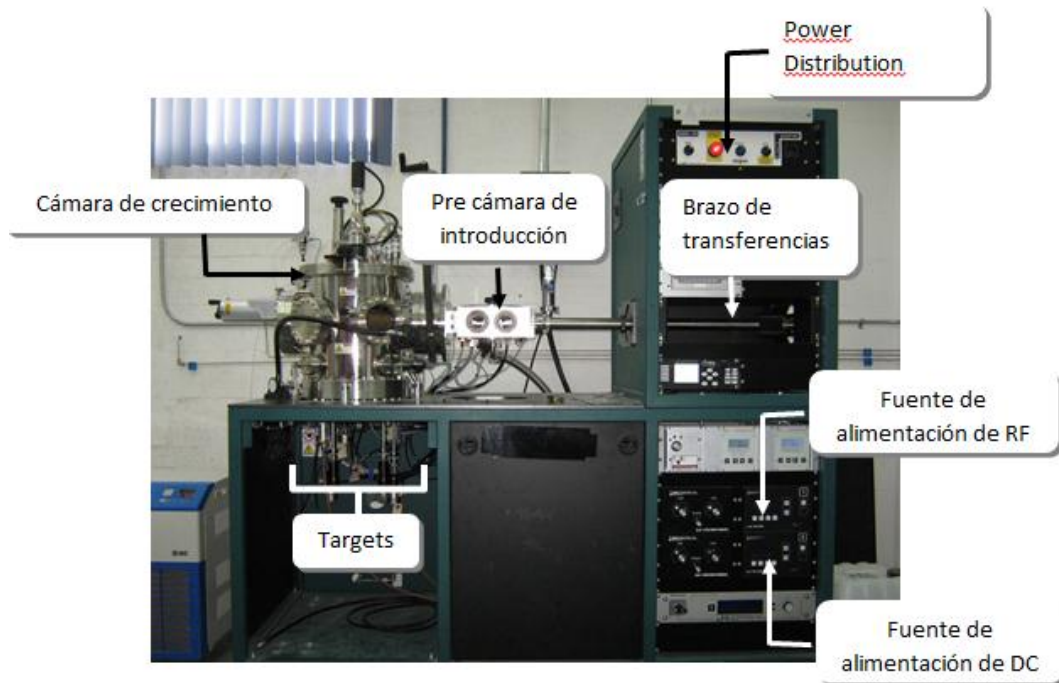


Figura 19 Partes del equipo sputtering

A continuación se describe el procedimiento empleado para la elaboración de las películas.

Se comenzó por depositar sobre el magnetrón que se encuentra dentro de la cámara de crecimiento con un target de  $Mn_3Ga$  desarrollado dentro de CIMAV. Véase la Figura 20.

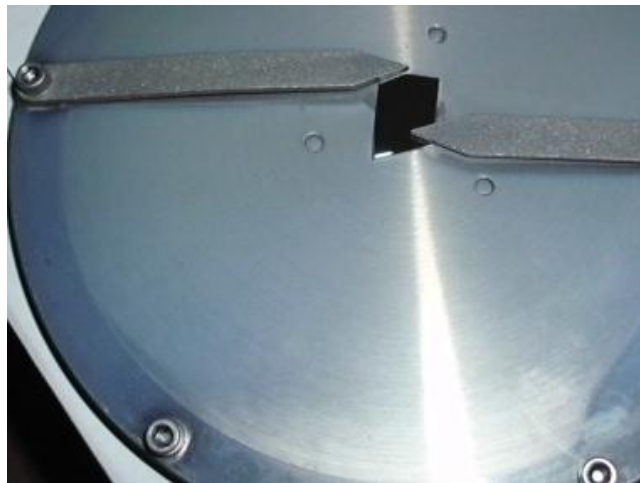


Figura 20 Material  $Mn_3Ga$  sobre el target dentro de la cámara de crecimiento.

Una vez depositado el blanco, se clivó el sustrato conformado de  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$ , donde se realizó el crecimiento, posteriormente se puso la muestra sobre el porta objetos de la pre-cámara (Figuras 21,22 y 23).



**Figura 21** Pre-cámara de la máquina de Sputtering.



**Figura 22** Sustrato de  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  sobre el porta objetos de la pre-cámara.



Figura 23 parte interna de la pre-cámara de Sputtering con el porta objetos.

Una vez posicionado el porta objetos, se deberá cerrar la pre-cámara, a través de una válvula que separa la cámara de crecimiento de la propia pre-cámara con la finalidad de que no exista flujo de contaminación de aire y gases por ambas partes. Una vez cerrada la válvula se comienza a generar el vacío dentro de la pre-cámara con la finalidad de extraer todo el aire que se encuentre dentro, por lo que se tendrá que activar la bomba mecánica (Figura 24, 25 y 26).



Figura 24 El ajustador de la válvula que separa la cámara de crecimiento de la pre-cámara



**Figura 25 Interruptor que activa la bomba mecánica.**



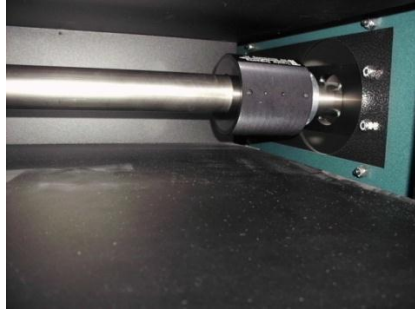
**Figura 26 Bomba mecánica.**

Una vez alcanzado una presión de  $2 \times 10^{-6}$  Torr en la pre-cámara se abre la válvula para ingresar la muestra en la cámara de crecimiento. En la Figura 27 se puede observar el indicador de presión de la pre-cámara.



**Figura 27 Indicador que muestra la presión de la pre-cámara.**

Una vez ajustada la presión de la pre-cámara se abre la válvula divisoria y a través del brazo de transferencia se traslada el sustrato hacia la cámara de crecimiento (Figuras 28 y 29).



**Figura 28 Brazo de transferencia.**



**Figura 29 transferencia de la muestra a través del brazo**

Ya que fue introducida la muestra a través del manipulador de la cámara de crecimiento se hace el anclaje del porta objetos a través de una perilla giratoria con la finalidad de sujetarla al plato giratorio de la misma (Figura 30,31 y 32).



**Figura 30 Cámara de crecimiento.**



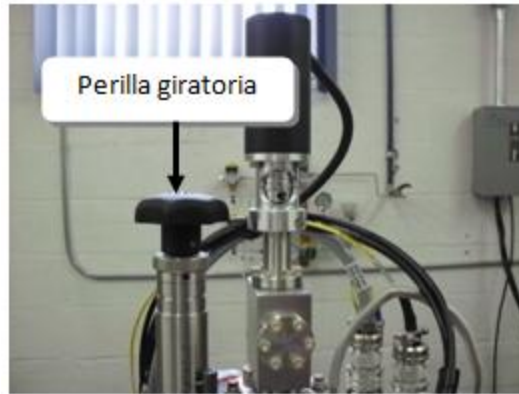


Figura 31 Manipulador del plato giratorio.

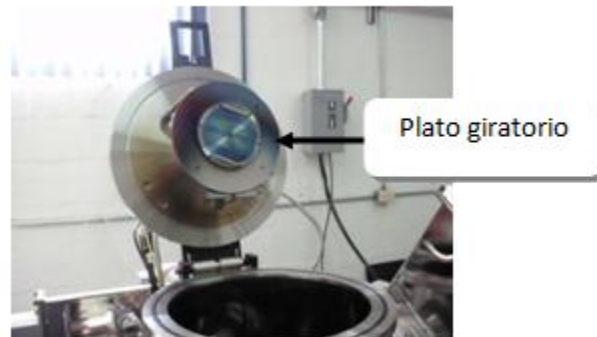


Figura 32 Plato giratorio con el porta muestras sosteniéndolo.

Una vez que se ha sujetado la muestra en el plato giratorio se le suministra temperatura y se enciende el sistema para girar el plato con la muestra con el objetivo de desgasificar partículas orgánicas (Figuras 33 y 34).



Figura 33 Control para la transferencia de temperatura.



Figura 34 Control de encendido del plato giratorio.

Pasado el tiempo deseado aplicando la temperatura sobre la muestra, se procede a la aplicación del gas inerte como lo puede ser el argón de 20 SCCM (Centímetros cúbicos estándar por minuto), antes de ingresar el gas, el sensor iónico debe estar apagado, debido a que las presiones que maneja la cámara de crecimiento al ingresar el argón deben ser bajas alrededor, de  $1 \times 10^{-3}$  Torr. Al pasar de una presión más baja, el sensor iónico se desactiva por su sistema de protección (Figuras 35 y 36).

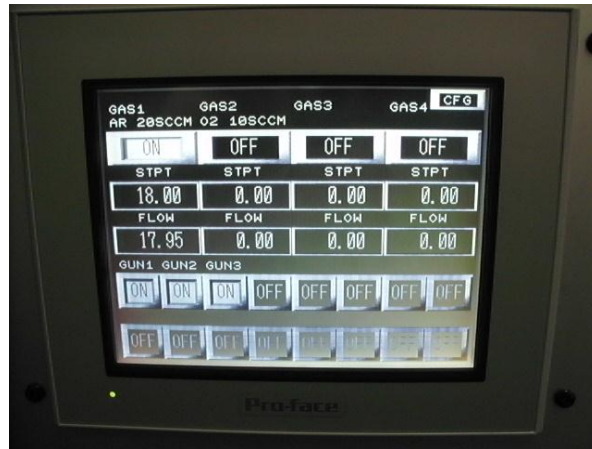


Figura 35 Panel que controla el suministro de gases en la cámara de crecimiento.

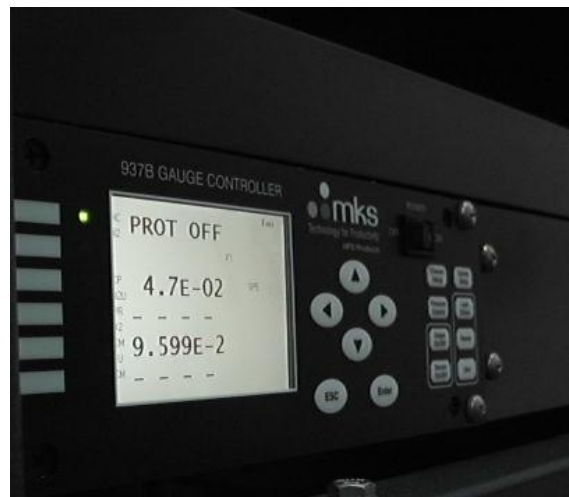


Figura 36 Sensor iónico.

Una vez, ingresado el Argón se prosigue a generar el plasma a través de corriente directa o radio frecuencia (Figura 37).



Figura 37 Suministro de energía a través de Radio Frecuencia. 2 suministro de energía por medio de Corriente Directa.

Se selecciona el magnetrón donde se depositó el blanco y posteriormente se enciende el sensor iónico para suministrar el vacío dentro de la cámara de crecimiento (Figuras 38, 39, 40).



Figura 38 Selector de los magnetrones.

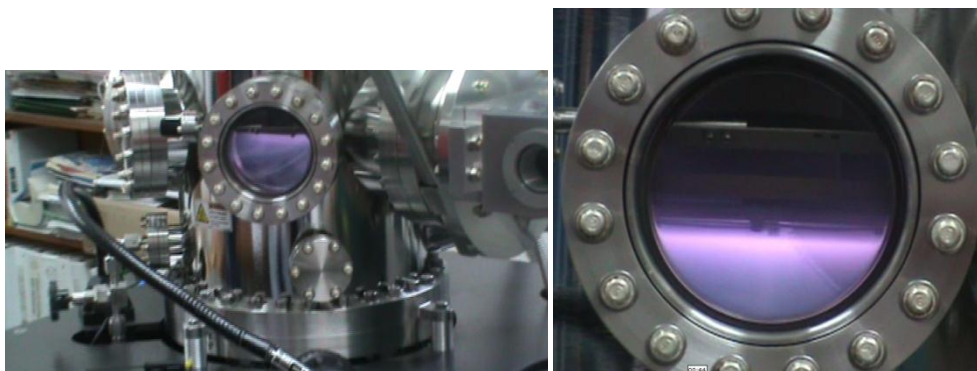


Figura 39 Plasma generado a partir del suministro de Ar y la fuente de energía.

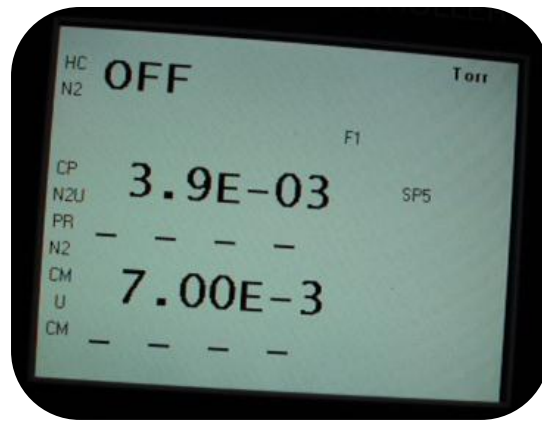


Figura 40 Se muestran los valores del sensor iónico.

## 7. Técnicas de caracterización empleadas

### 7.1. Difracción de Rayos X (XRD)

Una vez realizadas las películas a través de la técnica de erosión catódica, se les aplicó el estudio de Difracción de Rayos X (XRD). Esta técnica, es versátil y no destructiva, se utiliza en estructuras cristalinas, tanto de monocristalinas como policristalinas (pulverizadas).

De manera resumida, se puede decir que el funcionamiento de un sistema XRD es el siguiente:

Se hace incidir un haz de rayos X con longitudes de onda del orden de los  $10^{-9}$  a  $10^{-12}$  m sobre estructuras cristalinas que, al ser muy ordenadas geométricamente, dispersan los rayos X, con lo cual se permite identificar el arreglo que tienen las redes cristalinas analizadas por la interferencia constructiva de las ondas incidentes de acuerdo con la ley de Bragg. El equipo utilizado para obtener los resultados a través de XRD se conoce como difractómetro, mismo que consiste de un tubo que produce los rayos X que se difractan en la muestra, de acuerdo a la ley de Bragg. Los rayos difractados son medidos en un detector de estado sólido, convirtiendo los rayos en pulsos de corriente eléctrica que son controlados por dispositivos, como los equipos de cómputo, para procesar los datos obtenidos. La Figura 41 presenta un esquema simplificado del sistema XRD.

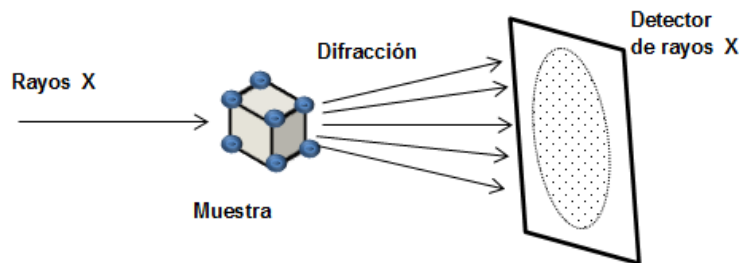


Figura 41 Esquema del método XRD.

El fenómeno de difracción se presenta cuando un haz de luz incide sobre un material. Debido a que una estructura cristalina posee una organización muy ordenada de los átomos que la forman, funciona como una rejilla por la cual el haz. Los espaciamientos atómicos y las longitudes de onda de los rayos X son de magnitudes de orden aproximadamente similares y, al golpear los rayos X ciertos planos cristalográficos con ángulos específicos, se difracta el haz de luz incidente (Figura 42). [23]

$$2d\sin\theta = n\lambda$$

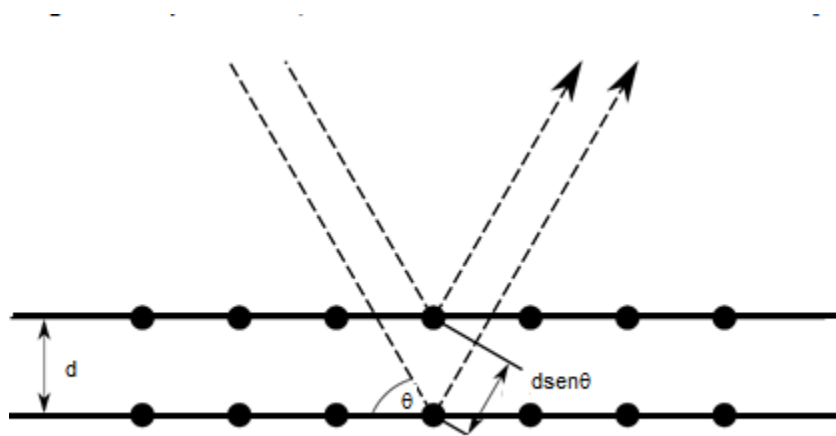


Figura 42 Ecuación y diagrama de la ley de Bragg.

Utilizar el método XRD permite conocer las propiedades físicas de las sustancias tras establecer cómo se encuentran organizadas las estructuras más pequeñas (moléculas o átomos). Al emplear esta técnica se logran determinar fases, estructura, textura y esfuerzos de tensión o compresión de las sustancias analizadas. La Figura 43 muestra un equipo DRX utilizado en CIMAV.



**Figura 43 Equipo DRX utilizado en CIMAV**

## **7.2. Microscopía de fuerza atómica (AFM)**

La técnica de microscopía por fuerza atómica, *AFM* (por sus siglas en inglés), forma parte del grupo de microscopía de barrido por sonda.

Este sistema permite conocer la topografía de algún material a través del barrido que la punta realiza en la superficie del material estudiado.

Los principales elementos que componen un sistema de AFM son: Cantiléver, punta, emisor de láser, foto-detector, escáner piezoeléctrico (en el cual es colocada la muestra), así como los sistemas de amplificador diferencial y lazo de retroalimentación, cómo lo muestra la Figura 44.



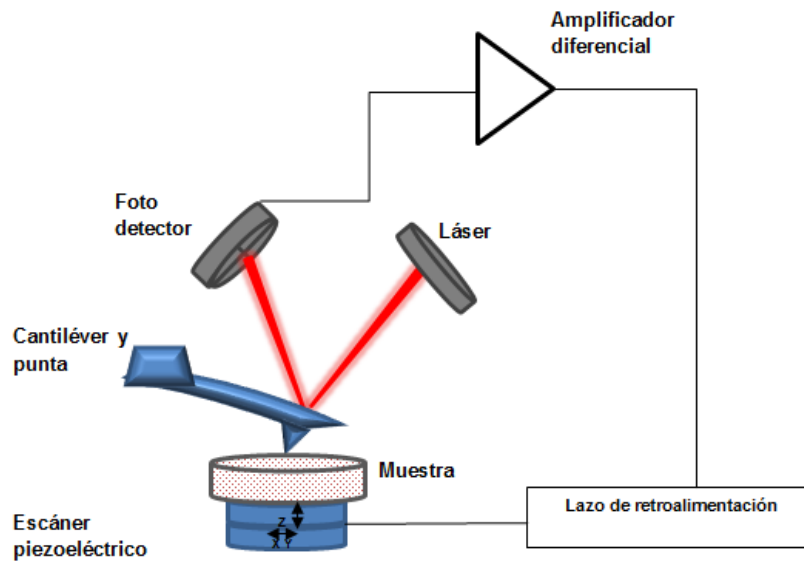


Figura 44 Esquema del sistema AFM.

El sistema AFM funciona, a grandes rasgos, de la siguiente manera:

La punta o sonda que se encuentra posicionada en el extremo del cantiléver (barra flexible en “voladizo”) hace un barrido sobre la superficie de la muestra. Utilizando un haz de láser que incide sobre el cantiléver y que, a la vez, es reflejado hacia un foto detector, se conoce la altura de la punta respecto a la superficie de la muestra. El barrido se puede llevar a cabo con el movimiento de la punta o con el de la muestra. La señal es amplificada y, a través del registro en un equipo de cómputo, se obtienen los mapas con el relieve de la muestra estudiada. [24]

Las dos principales formas de operar son las de contacto y no contacto. En la primera, la punta se sitúa a unos cuantos angstroms de la superficie de la superficie estudiada, provocando fuerza de repulsión. Mientras que en el modo de operación de no contacto, se sitúa la punta a varios angstroms, incluso a cientos, generándose una fuerza de atracción. [25]

Un sistema similar es el microscopio de efecto túnel pero, el AFM permite estudiar materiales aislantes o semiconductores, y no sólo materiales metálicos o conductores. Además, de que el microscopio de efecto túnel mide la magnitud de corriente eléctrica para obtener las imágenes del material analizado, mientras el AFM no depende del parámetro eléctrico sino de las fuerzas electrostáticas (Van der Waals) de los átomos. Un equipo AFM utilizado en CIMAV es mostrado en la Figura 45.

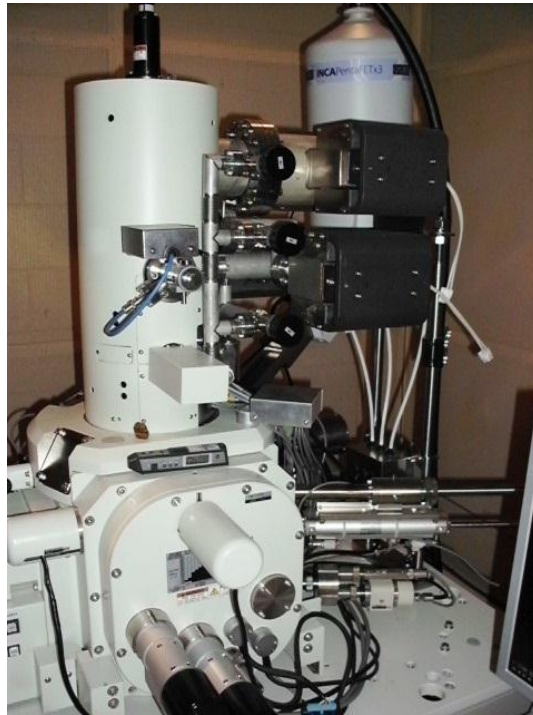


Figura 45 Equipo AFM utilizado en CIMAV.

### 7.3. Microscopio Electrónico de Barrido (SEM)

Las técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido (*SEM*, por sus siglas en inglés) y Microscopía Electrónica de Transmisión (*TEM*, por sus siglas en inglés) son utilizadas en el estudio y análisis de materiales microestructurales de objetos sólidos, dichas técnicas nos permiten observar muestras en dos y tres dimensiones según el análisis requerido, a continuación se describen la técnicas que utilizadas en las películas de  $Mn_3Ga$ .

Es un equipo electrónico que tiene la capacidad de observar objetos en tres dimensiones con una resolución de hasta 1nm, es utilizado para el análisis y estudio de objetos sólidos, a esta técnica se le denomina como microscopia electrónica de barrido. Un microscopio SEM es mostrado en la Figura 46.



**Figura 46 Microscopio Electrónico de Barrido.**

Su funcionamiento consiste en hacer incidir un barrido de haz de electrones acelerados con energía de hasta 50KeV que proviene de un cañón generador del haz de electrón que y que posteriormente se hace incidir sobre la muestra. Cuando la muestra es orgánica o aislante generalmente es cubierta con una capa muy fina de oro o carbón mediante la técnica de sputtering para evitar que las cargas eléctricas se queden atrapadas en la superficie de la muestra y se pierda el contraste de la imagen.

El microscopio está formado por diversos detectores, entre los que se pueden mencionar el detector de electrones secundarios, detector de electrones retrodispersados y un detector de energía dispersiva. [26]

**Detector de electrones secundarios:** Son electrones de muy baja energía que resultan de la emisión de los átomos debido a la colisión con el haz de electrones que incide sobre la muestra, esto ofrece una imagen tridimensional en blanco y negro en alta resolución de la superficie examinada. La Figura 47 muestra una imagen obtenida por SEM de alta resolución.

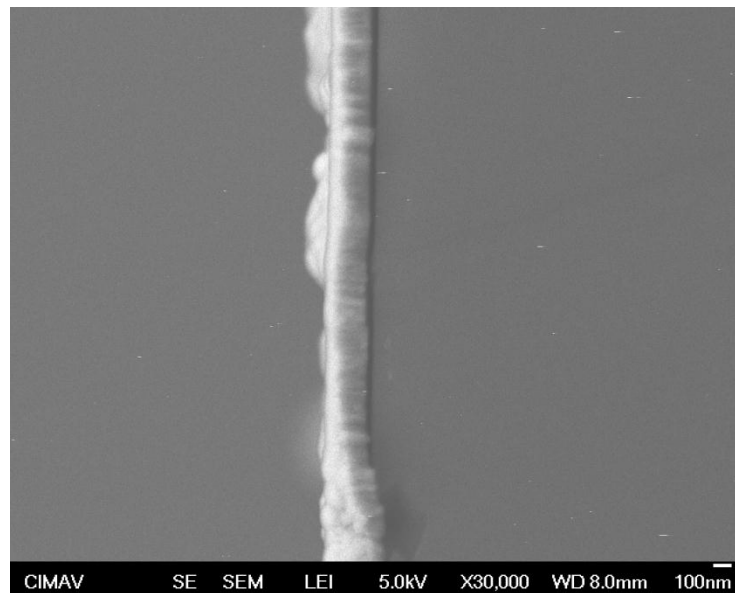


Figura 47 Imagen obtenida a través de microscopía SEM de alta resolución.

**Detector de electrones retrodispersados:** Son electrones del haz incidente que han interactuado con los átomos de la muestra y por consiguiente han sido reflejados, esto ofrece una imagen de menor resolución pero podemos analizar diferencias en su composición química, ya

que la intensidad del haz reflejado es directamente proporcional con el número atómico del material. Véase un ejemplo en la Figura 48 de imagen obtenida por electrones dispersados.

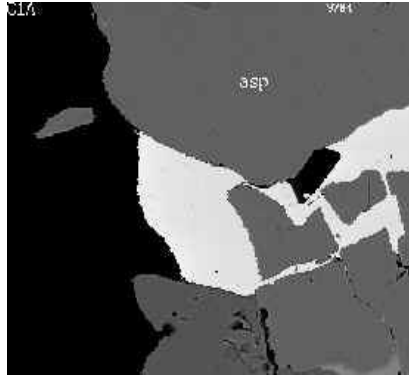


Figura 48 Imagen obtenida por electrones retrodispersados.

Las señales emitidas por los electrones y la radiación resultante son amplificadas línea por línea y pasan por un tubo de rayos catódicos para darle mayor o menor intensidad en la fluorescencia de la imagen. En Figura 49 se describen las etapas del funcionamiento del SEM.

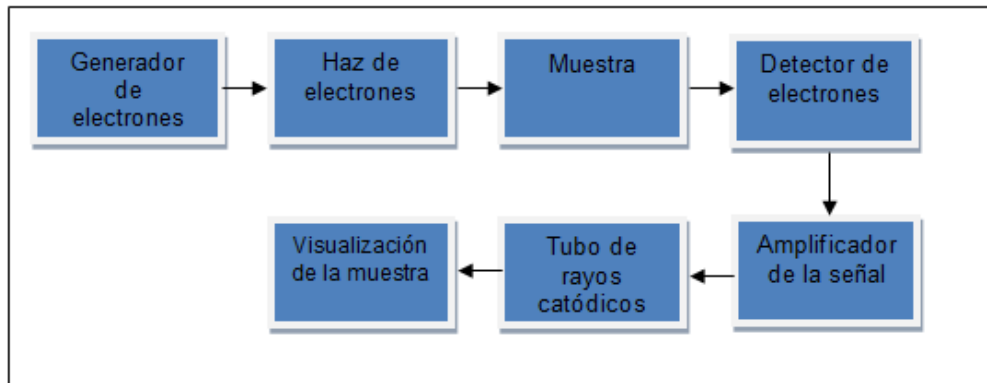


Figura 49 Diagrama a bloques del microscopio electrónico de barrido.

Aplicaciones:

El uso de dichos equipos es muy variado en diferentes ramos, en la industria petroquímica, metalurgia, arqueología, biomedicina, etc. Algunas de las aplicaciones son: Investigación de cristalografía, mineralogía y petrología, también caracterización de materiales, y caracterizaciones morfológicas.

#### **7.4. Espectroscopía de energía dispersa de rayos X (EDS)**

Utilizando SEM se puede emplear otra técnica de caracterización, conocida como espectroscopía de energía dispersa de rayos X o *EDS* (por sus siglas en inglés). Esta técnica permite conocer la composición química de los compuestos analizados, obteniendo una gráfica espectral con los porcentajes de los elementos que conforman dichas muestras. En la Figura 50 muestra una imagen EDS en pantalla de la computadora.

En esta técnica, se mide la energía de los rayos X generados por la interacción del haz de electrones del microscopio con los enlaces químicos del material. Utilizando un detector, consistente en un cristal semiconductor, en el que incide un fotón de rayos X, produciéndose una ionización de cierto número de átomos del mencionado cristal, de tal manera que entre mayor sea la energía del fotón, mayor será también la cantidad de átomos ionizados. Así, se logra registrar el conteo de fotones con determinadas las frecuencias de las energías y medir la transición del átomo al que corresponda. Con la medición realizada, el equipo genera una gráfica semicuantitativa que es mostrada. Además de indicar el tipo de átomos a los que corresponde la energía medida, también se obtiene mediante manipulación computacional de las intensidades de los picos, la información correspondiente a la concentración de dichos átomos, para así obtener los porcentajes de cada elemento que componen una sustancia. [27] Véase una espectroscopía obtenido por la técnica EDS en la Figura 50.

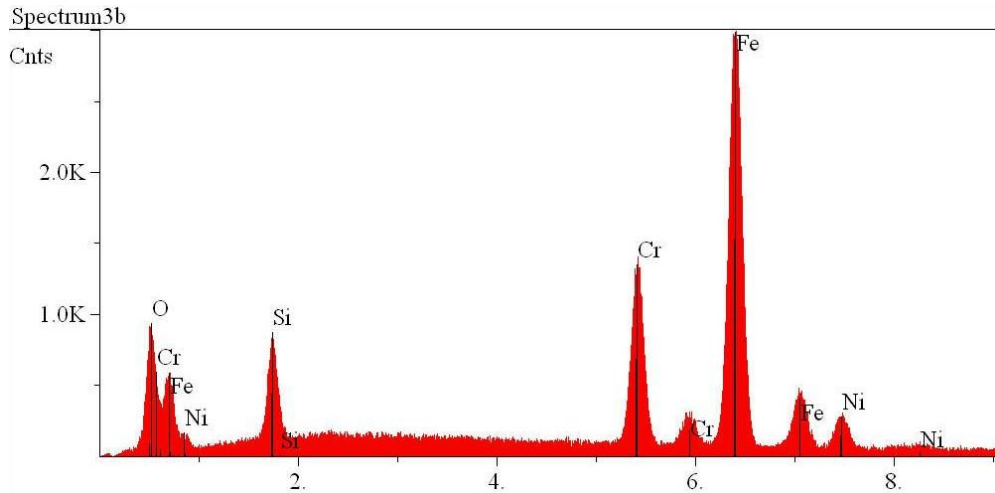


Figura 50 Imagen con espectro EDS.

La mayoría de los equipos utilizados para la técnica EDS requieren el suministro de nitrógeno líquido para el enfriamiento del cristal. Sin embargo, recientemente se han logrado avances importantes en la fabricación de los cristales usados, que permiten llevar a cabo las mediciones a temperatura ambiente, con lo que se ha hecho más práctica esta técnica de caracterización. La Figura 51 muestra un diagrama del efecto de esta técnica.

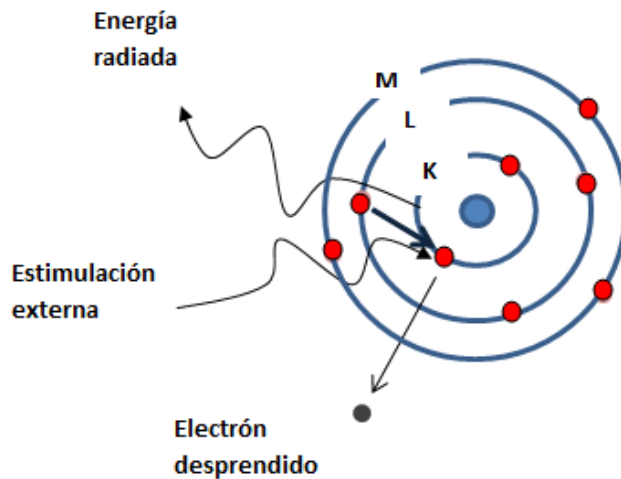


Figura 51 Esquema del método EDS

## 8. RESULTADOS

Las películas de  $Mn_3G$  fueron depositadas sobre sustrato de  $SiO_2/Si(001)$  debido a su bajo costo, además de que la superficie del óxido es muy plana, teniendo una rugosidad del orden de 2-3 Å, por otro lado, el silicio es el material más utilizado en la industria de la microelectrónica, donde alrededor del 95% de los dispositivos fabricados están elaborados sobre Si.

Previo a la síntesis de las películas de  $Mn_3Ga$ , se calibró la velocidad de depósito del  $Mn_3Ga$  haciendo varios de estos por 2 horas con diferentes potencias, manteniendo el sustrato a 300°C.

Una velocidad idónea fue de 3 nm/min a una potencia de 40 W, utilizando una alimentación de RF (radiofrecuencia), en cuya erosión de depósito es más suave que la alimentación de DC (corriente directa), esta erosión de depósito es más rápida pero quedan más defectos cristalinos.

La temperatura de crecimiento (temperatura del sustrato) fue de 300 ° C que es la temperatura que permite la mejor calidad cristalina en las películas [4].

También la presión de trabajo se ajustó a 3 mTorr.

Con estas condiciones los tiempos de depósito para las películas de 2, 5, 10 y 50 nm, fueron 0.67, 1.67, 3.34 y 16.7 minutos, respectivamente.

Posteriormente se determinó que la composición de la película depositada corresponde a la estequiometría del  $Mn_3Ga$  utilizando la técnica de espectroscopia de energía dispersa de rayos X (EDS) obteniendo un porcentaje de 74.5% de Mn y 25.5% de Ga. El espectro experimental se muestra en la Figura 52

---

<sup>4</sup> J.M.D. Coy (published 12 January 2011) High Spin Polarization in epitaxial films of ferrimagnetic  $Mn_3Ga$  pp. 3.



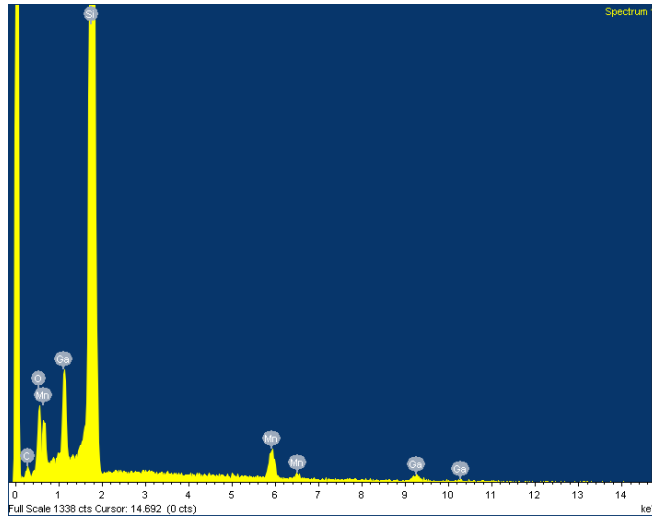


Figura 52 Espectro EDS de una película de Mn<sub>3</sub>Ga/SiO<sub>2</sub>/Si(001).

Consecutivamente, las películas de Mn<sub>3</sub>Ga fueron caracterizadas por XRD, para determinar las fases presente ( $\tau$ ) y ( $\epsilon$ ), las cuales muestran los patrones de difracción que corresponden a los picos de la gráfica mostrada en la Figura 53 que pertenecen al sustrato de silicio en sus diferentes espesores de 2, 5, 10 y 50 nm, también se observa la reflexión de la familia de los planos indicados (004) para los diferentes espesores.

En la película de 50 nm se observa además la reflexión de la familia de los planos (101), (002) y (200) y una fase ( $\epsilon$ ), después de un espesor de 10 nm.

Por otra parte al hacer la comparación de las muestras que se ilustran en la Figura 53 se determinó que se encontraba una fase tetragonal debido a que se hizo la comparación de las muestras con la que se expone en la Figura 54 consultado en el artículo “*Exchange-biased magnetic tunnel junctions with antiferromagnetic  $\epsilon$ -Mn<sub>3</sub>Ga* del Autor Coy”, en el que se muestra el experimento con el mismo material y se determina que se encuentra una fase tetragonal, esto, a razón de que no se tiene el conocimiento de la existencia de cartas cristalográficas para el material de Mn<sub>3</sub>Ga.

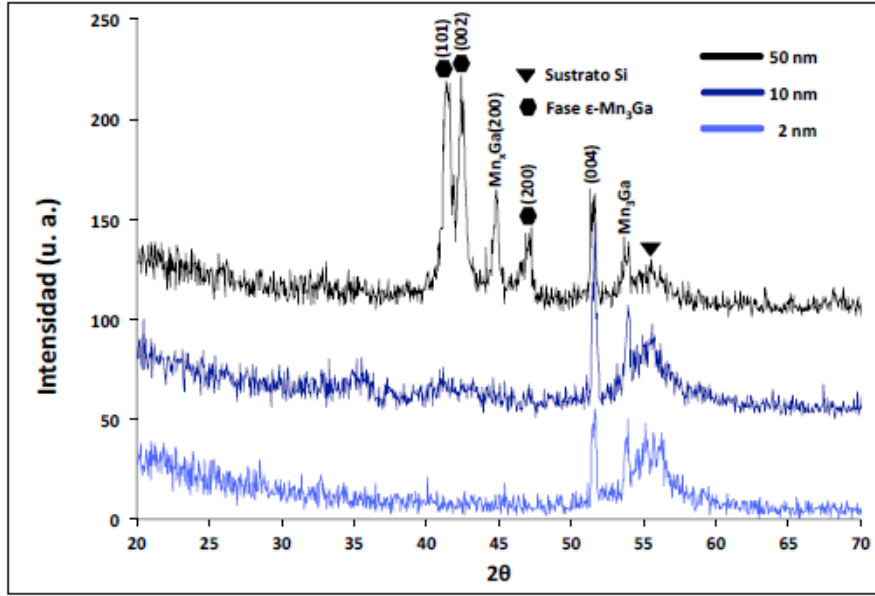


Figura 53 Caracterización por XRD de las películas de Mn<sub>3</sub>Ga.

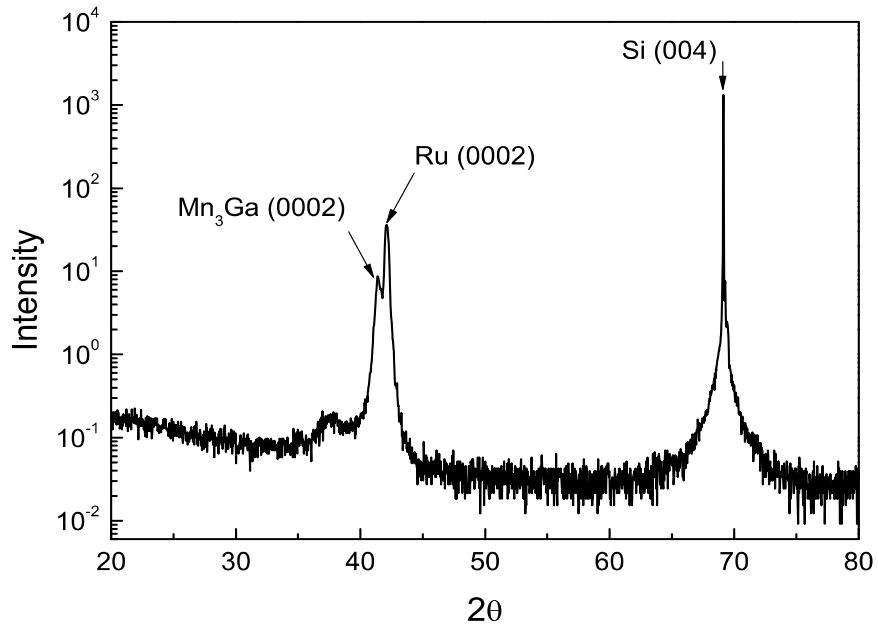


Figura 54 Difracción de Rayos X de Mn<sub>3</sub>Ga<sup>[5]</sup>

<sup>5</sup> Coey, M. D. (2012). Exchange-biased magnetic tunnel junctions with antiferromagnetic. PHYSICAL REVIEW pp. 3.

Seguido de la aplicación de microscopia de fuerza atómica (AFM) se determinó la morfología que presenta la superficie a los diferentes espesores, para la imagen (a) con un espesor de 2 nm, muestra una rugosidad de 0.38 nm y una profundidad promedio de 2.89 nm; la imagen (b), con un espesor de 5 nm, una rugosidad de 0.87 nm, y una profundidad promedio de 7.69 nm; la imagen (c), con un espesor de 10 nm y una rugosidad de 1.14 nm y una profundidad promedio de 7.14 nm; la imagen (d) con un espesor de 10 nm y una rugosidad de 6.82 nm y una profundidad promedio de 41.2 nm. Los resultados se muestran en la Figura 55

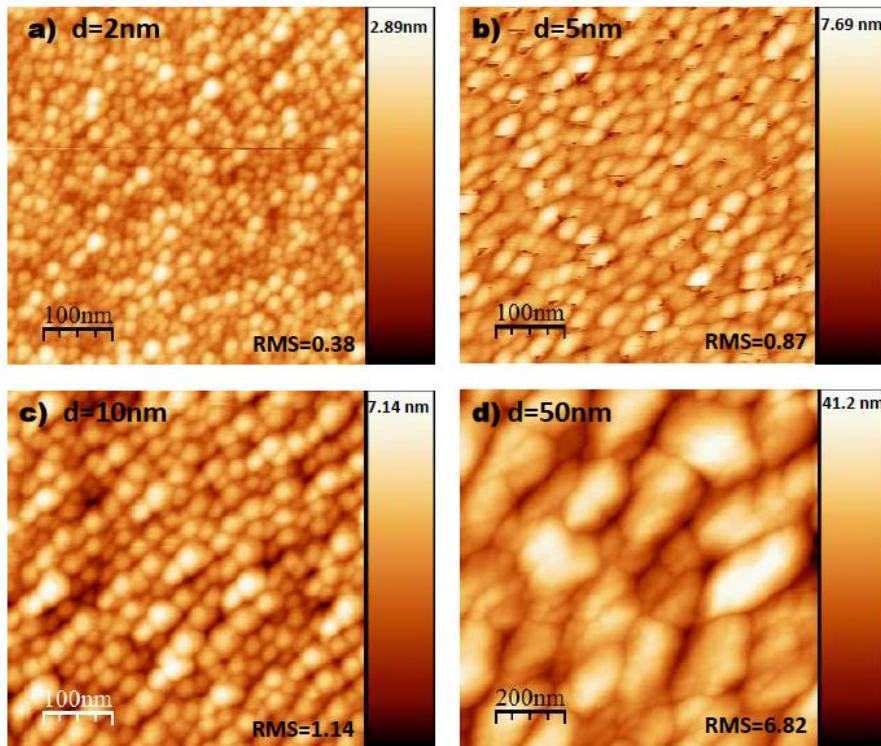


Figura 55 Imágenes obtenidas por AFM.

Así también se evaluó el comportamiento de crecimiento del tamaño de grano, dichas mediciones se realizaron con el software WSxM. Para ello se tomaron perfiles de aproximadamente 200 granos por cada imagen de las obtenidas por AFM. En la Figura 56 se muestra un perfil para 4 granos correspondientes a la muestra de la película con espesor de 5 nm.

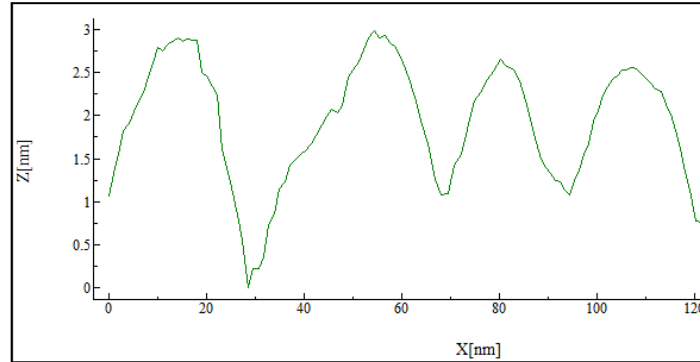


Figura 56 Medición de grano en película de 5 nm realizada con el software WsxM.

La evolución del tamaño de grano para las se ajustó por medio de la ecuación:  $G^n = K_0 t \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) = Ct$  (Ecuación 1)

Donde G representa el crecimiento de grano de las películas de  $Mn_3Ga$  sobre sustrato de  $SiO_2/(001)$  con espesores de 2, 5, 10 y 50 nm. Los granos obtenidos en las películas con espesores de 2, 5, 10 nm se ajustan la ecuación 1 donde  $T=300$  K y  $n=3.3$ , como un valor constante preexponencial cinético de crecimiento de grano, al despejar dicha constante se obtiene la raíz de acuerdo al crecimiento del material  $Mn_3Ga$ , se tomó dicho valor para tener un crecimiento relativamente lento, obteniendo una estructura cristalina tetragonal ( $\tau$ ), mientras el tamaño de grano de la película de 50 nm no corresponde a la cinética de crecimiento descrita por la ecuación anterior. El espesor de las películas es proporcional al tiempo. La Figura 56 muestra la gráfica obtenida.

Para identificar la morfología de la superficie, el comportamiento de la cinética de crecimiento, y la fase o fases presentes con mayor exactitud es necesario elaborar más películas con espesores de 3, 4, 6, 7, 8 y 9 nm y nuevamente evaluar sobre la ecuación de ajuste, además de someterlas a otros niveles de temperatura, por ejemplo 350 K y 400 K, y así obtener más datos y evaluar el comportamiento, también es necesario repetir el proceso de elaboración de películas y experimentación para asegurarse de los resultados obtenidos.

De la misma forma, para identificar, el comportamiento de la cinética de crecimiento, y la fase o fases presentes para la película con espesor de 50 nm se requiere, elaborar más películas consecutivas al valor del espesor mencionado.

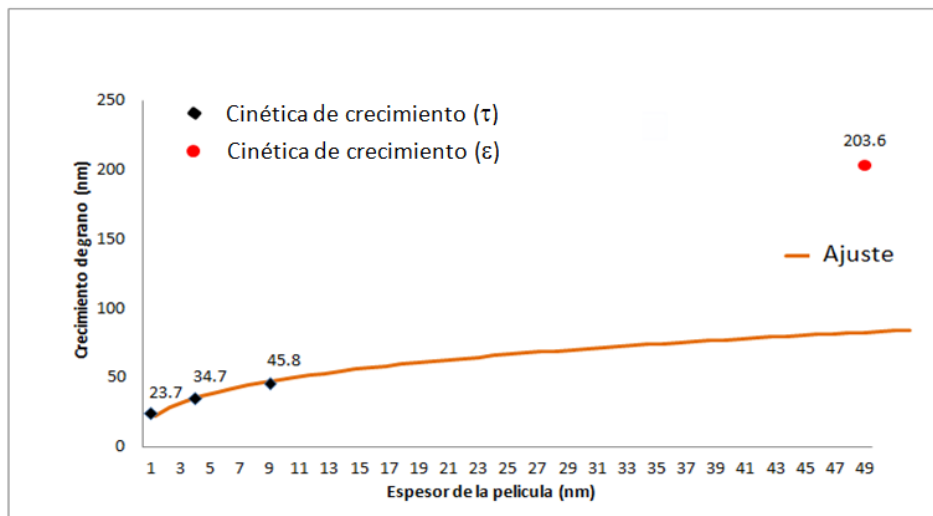


Figura 57 Gráfica de crecimiento de grano.

Los espesores del material provocan cambios en la estructura cristalina y, consecuentemente, en sus fases. En la elaboración de películas de  $Mn_3Ga$  sobre sustratos de  $SiO_2/Si(001)$ , la utilización de técnicas de estudio de materiales como la de microscopía de fuerza atómica (AFM) y de

difracción de rayos X (XRD) han arrojado resultados interesantes, tanto de su morfología y su estructura cristalina, respectivamente.

En cuanto a la morfología encontrada con AFM, se logran obtener imágenes de los granos para identificar sus tamaños, de esta manera se puede llevar a cabo la relación entre los espesores de las películas y los tamaños de los granos obtenidos con las fases cristalinas que éstos presentan. Por ejemplo, en películas de espesores de 2 y 10 nm, los patrones obtenidos bajo la técnica de XRD muestran que se conserva la fase tetragonal. Para espesores superiores a los 50 nm, se obtienen resultados de XRD que indican que la fase es hexagonal. La Figura 58 muestra el diagrama obtenido de XRD que indica la dependencia de la fase con el espesor del material.

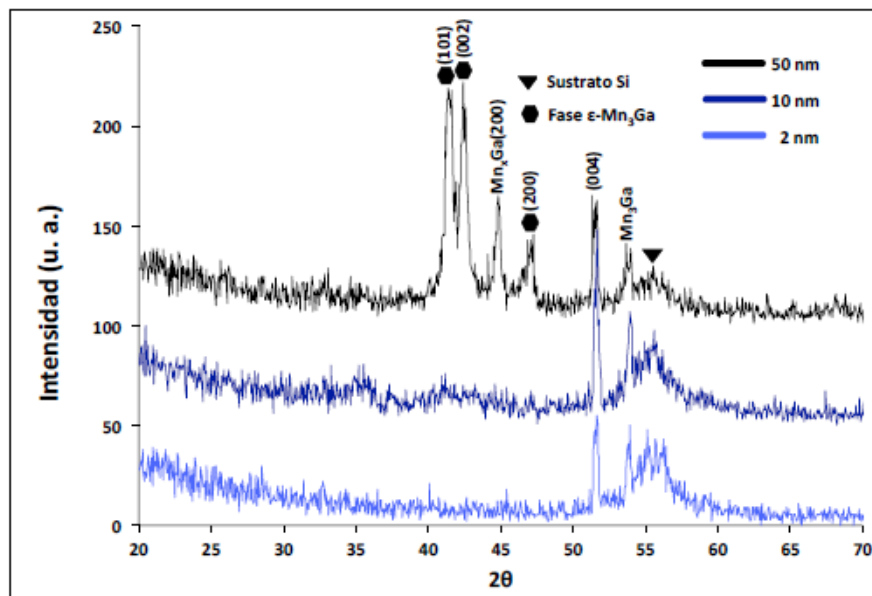


Figura 58 Diagrama de XRD que muestra la evolución de las fases a distintos espesores de películas de  $Mn_3Ga$  elaboradas sobre  $SiO_2/Si(001)$  a una temperatura de  $300^\circ C$ .

Se ha determinado que en espesores a partir de 10 nm el  $Mn_3Ga$  comienza a nuclear a la fase hexagonal.

Los comportamientos del  $\text{Mn}_3\text{Ga}$  son: para la fase tetragonal como ferrimagnético y para la fase hexagonal como antiferromagnético. De esta manera, el material objeto de este trabajo presenta las peculiares propiedades que permiten estudiar la evolución magnética de las películas dependientes del espesor y sus importantes aplicaciones en el campo de la Espintrónica. [10]

Dentro de las principales ventajas que presenta este material es la alta temperatura de Curie, baja magnetización, alta coercitividad magnética y alta constante de anisotropía magnetocristalina.

Esta técnica fue fundamental para la interpretación de los resultados obtenidos en la elaboración de las películas a diferentes espesores, dado que se logró establecer que la fase cristalina depende del espesor de la película y del tamaño de grano.

Como se mencionó anteriormente, al abordar las propiedades del material estudiado, el espesor de las películas es determinante para la obtención de la fase de la estructura cristalina, pues gracias a esta técnica se encontró que para películas menores a 10 nm la fase es tetragonal ( $\tau\text{-Mn}_3\text{Ga}$ ) y para espesores mayores es hexagonal ( $\epsilon\text{-Mn}_3\text{Ga}$ ), lo cual a su vez determina las propiedades magnéticas del dicho material, ferrimagnetismo para la fase tetragonal y antiferromagnetismo para la fase hexagonal. La Figura 58 muestra el diagrama obtenido de XRD que indica la dependencia de la fase con el espesor del material.

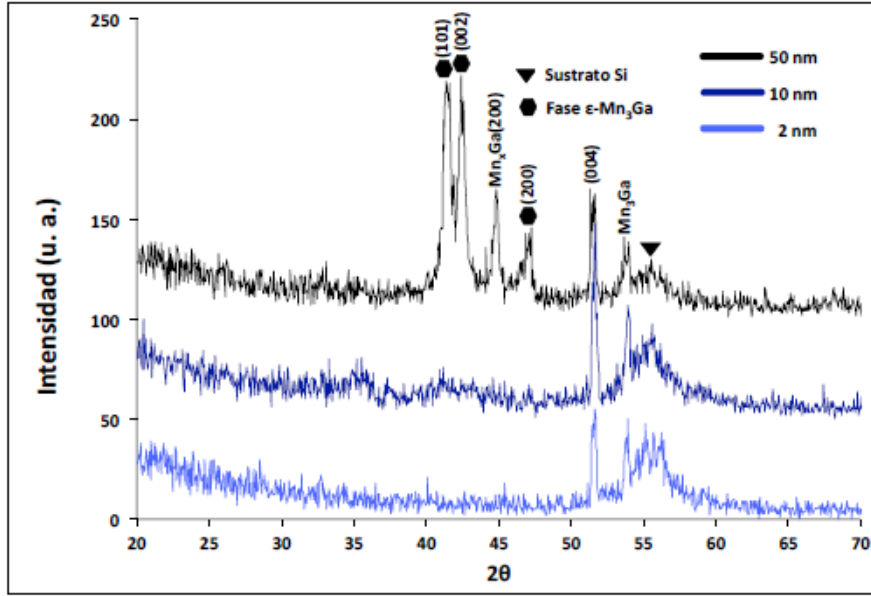


Figura 59 Diagrama de XRD que muestra la evolución de las fases a distintos espesores de películas de Mn<sub>3</sub>Ga elaboradas sobre SiO<sub>2</sub>/Si(001) a una temperatura de 300° C.

Para este trabajo, el uso de esta técnica de microscopía fue de vital importancia, pues con ella se estudió la morfología de la superficie (tamaño de grano y dispersión de tamaño) que componen la película elaborada. Al realizar este estudio se pudieron constatar las relaciones del tamaño de grano. Más adelante se explicará la importancia de este hecho.

En la Figura 60 se observa una imagen de la morfología de superficie obtenida a través de AFM donde se observan los granos de este material.



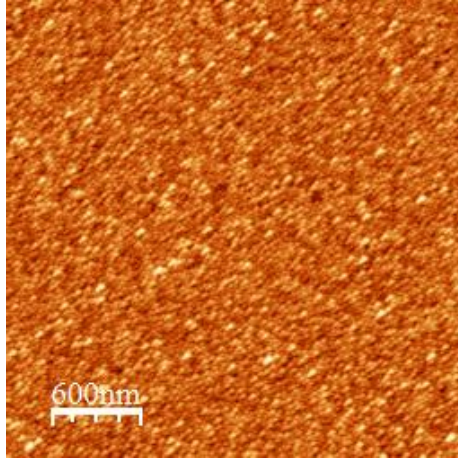


Figura 60 Imagen de morfología de superficie de película de Mn<sub>3</sub>Ga obtenida a través AFM.

### **Películas de Mn<sub>3</sub>Ga sobre sustrato de SiO<sub>2</sub>/(001)**

La siguiente gráfica (Figura 62) representa el crecimiento de grano de las películas de Mn<sub>3</sub>Ga sobre sustrato de SiO<sub>2</sub>/(001) con un espesor de 2, 5, 10 y 50 nm, únicamente los granos obtenidos en las películas con espesores de 2, 5, 10 nm se ajustan la ecuación donde T=300° C y n=3.3, obteniendo una estructura cristalina tetragonal ( $\tau$ ), mientras el tamaño de grano de la película de 50 nm no corresponde a la cinemática de crecimiento descrita por la ecuación anterior. El espesor de crecimiento es proporcional al tiempo.

$$G^n = K_0 t \exp(-Q/RT)$$

Donde  $G$  es el promedio de crecimiento del grano respecto al tiempo,  $n$  es el valor cinético de crecimiento del grano,  $K_0$  es la constante del material,  $Q$  es la energía aparente del material,  $R$  es la constante universal de los gases y  $T$  es el valor de la temperatura absoluta a la que se somete dicho material.

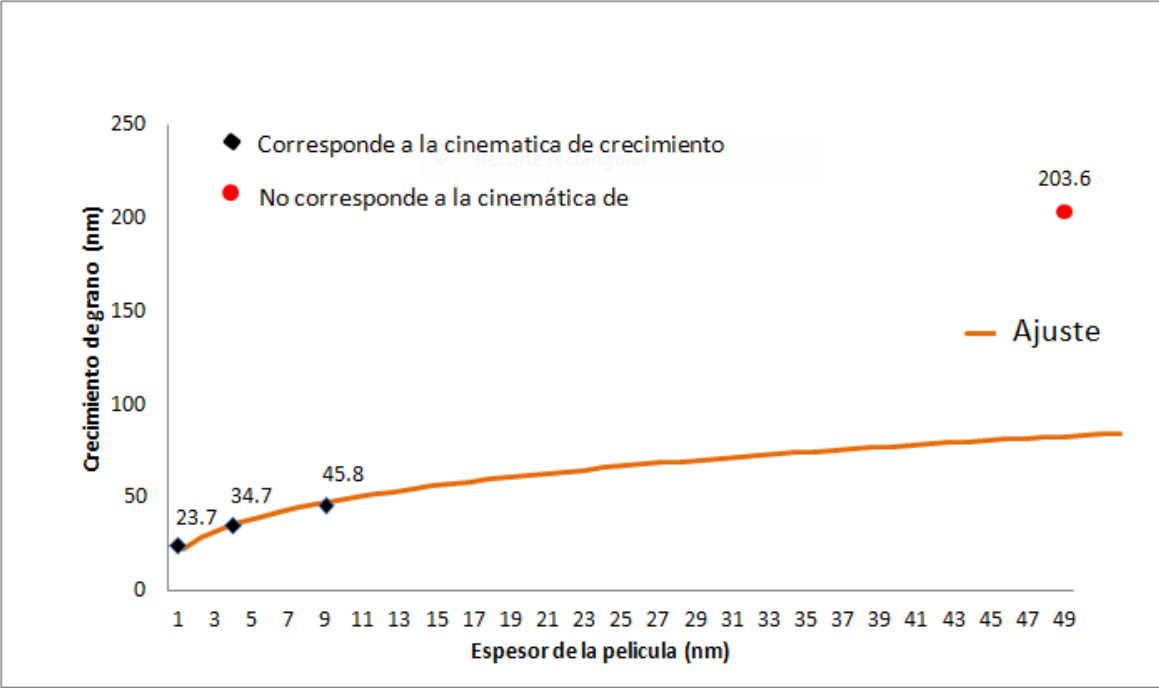


Figura 61 Películas de Mn<sub>3</sub>Ga sobre sustrato de SiO<sub>2</sub>/(001)

## Cálculo de las masas de cada muestra

Para realizar una comparación gráfica de las muestras se tuvieron que realizar las siguientes cálculos.

Masas atómicas:

$$\text{Mn} \rightarrow 54.938 \text{ g/mol}$$

$$\text{Ga} \rightarrow 69.723 \text{ g/mol}$$

Densidad:

$$d = 7.78 \times 10^{-22} \text{ g} / 110.2 \times 10^{-24} \text{ cm}^3$$

$$d = 7.05 \text{ g} / \text{cm}^3$$

Masa de cada muestra:

$$m = Vd$$

- Masa para muestra 2 nm:

$$m = (8 \times 10^{-9} \text{ cm}^3) (7.05 \text{ g} / \text{cm}^3)$$

$$m = 56.4 \times 10^{-9} \text{ g}$$

- Masa para muestra 10 nm:

$$m = (40 \times 10^{-9} \text{ cm}^3) (7.05 \text{ g} / \text{cm}^3)$$

$$m = 282 \times 10^{-9} \text{ g}$$

- Masa para muestra 50 nm:

$$m = (200 \times 10^{-9} \text{cm}^3) (7.05 \text{g}/\text{cm}^3)$$

$$m = 1.41 \times 10^{-6} \text{g}$$

## Gráficas de medición magnéticas de las muestras

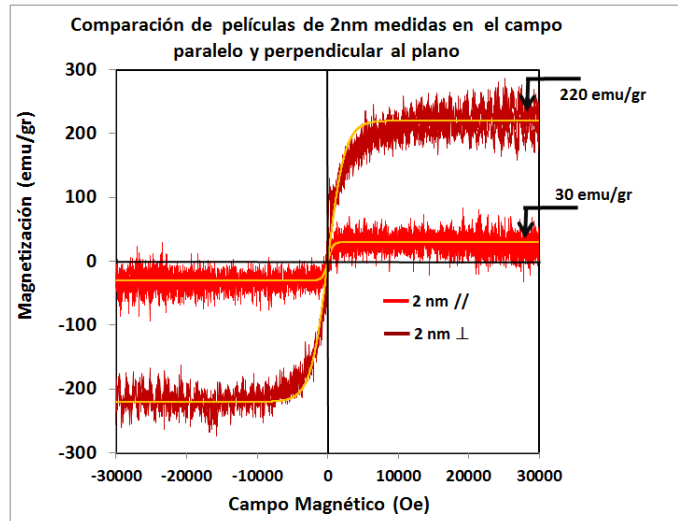


Figura 62 Muestra de 2nm comparadas en el campo paralelo y perpendicular

En la gráfica se hace una comparación de la muestra de 2nm medida en el campo paralelo y perpendicular, donde se puede apreciar, que la medición en la parte perpendicular tiene mayor saturación magnética que en el campo paralelo. Asimismo, muestra mayor ruido en la gráfica medida en el campo perpendicular y es atribuido a que la muestra alcanza la medida en la resolución del equipo que fue utilizado para su medición.

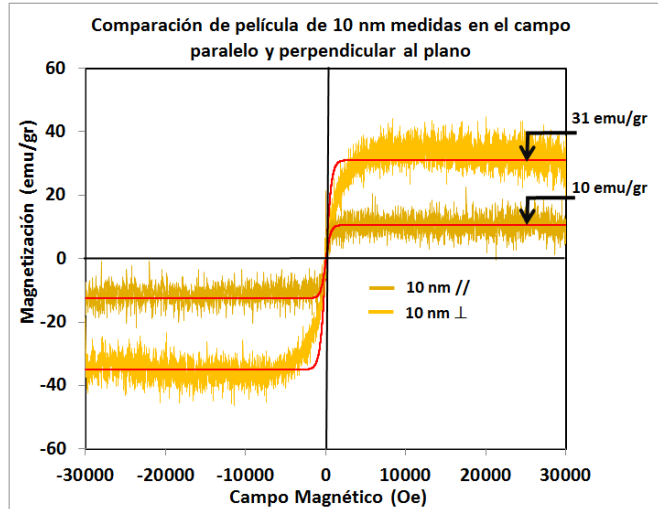
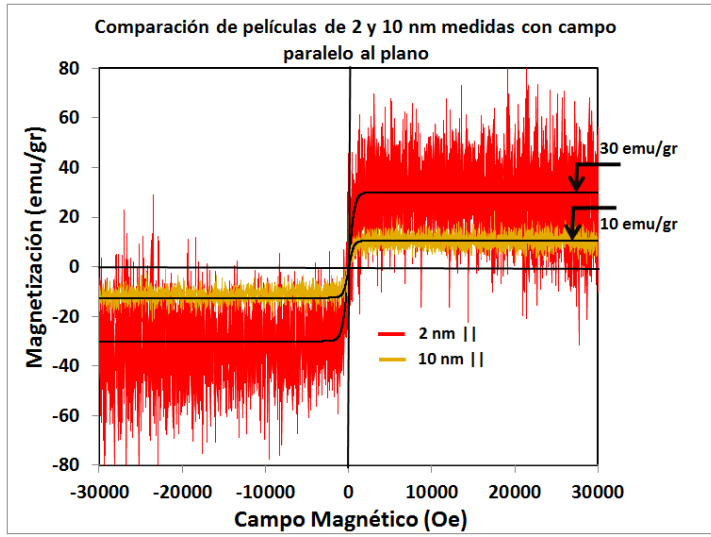


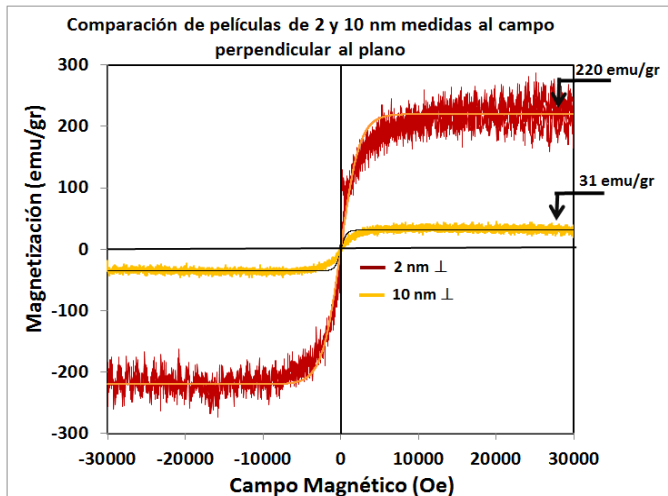
Figura 63 Muestra de 10nm comparadas en el campo paralelo y perpendicular

En la imagen de la izquierda también se hace una comparación de la muestra de 10nm medida en el campo paralelo y perpendicular, donde se puede apreciar, que la medición en la parte perpendicular tiene mayor saturación magnética que en el campo paralelo.



En la imagen se hace una comparación de la muestra de 2nm y 10nm medidas en el campo paralelo y perpendicular, donde se muestra mayor saturación de magnetización en la muestra de 2 nm con respecto a la de 10nm.

Figura 64 Muestra de 2 y 10 nm comparadas en el campo paralelo.



En la imagen se hace una comparación de la muestra de 2nm y 10nm medidas en el campo perpendicular y perpendicular, donde se muestra mayor saturación de magnetización en la muestra de 2 nm con respecto a la de 10nm.

.Figura 65 Muestra de 2 y 10 nm comparadas en el campo perpendicular.

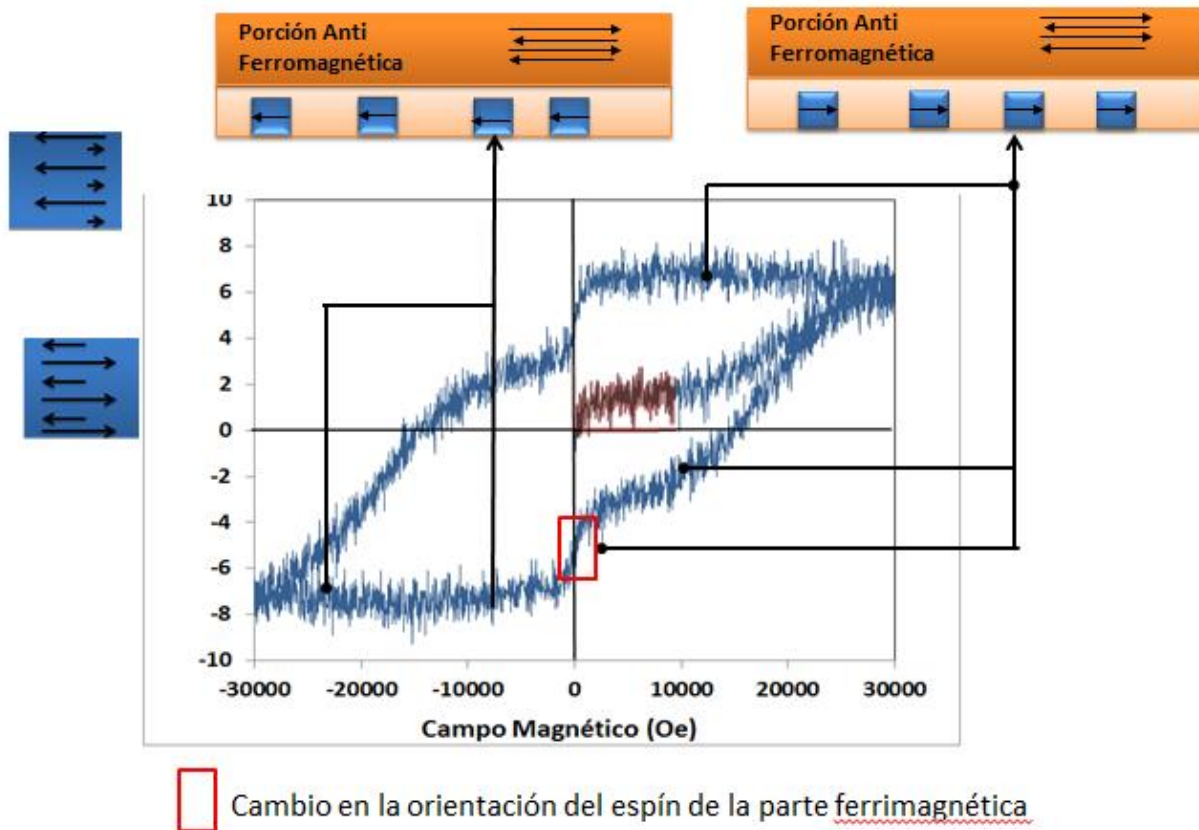


Figura 66 Gráfica de película de 50nm medida en el campo paralelo

Para la aplicación del campo magnético paralelo al plano, cuando se alcanza la magnetización de saturación positiva, se tiene cierto nivel de momento magnético. Al dejarse de aplicar el campo, al cruzar por el eje +y (en la porción ferrimagnética), disminuye la magnitud del momento magnético, conservando la misma orientación y dirección. Aplicando el campo inverso se conserva el nivel del momento magnético pero cambia su dirección. Posteriormente, al llegar a la magnetización de saturación negativa, conservando la última dirección adquirida, vuelve a aumentar la magnitud del momento. Para el segundo semi-ciclo, sucede lo mismo que en el primero, pero con polaridad inversa.



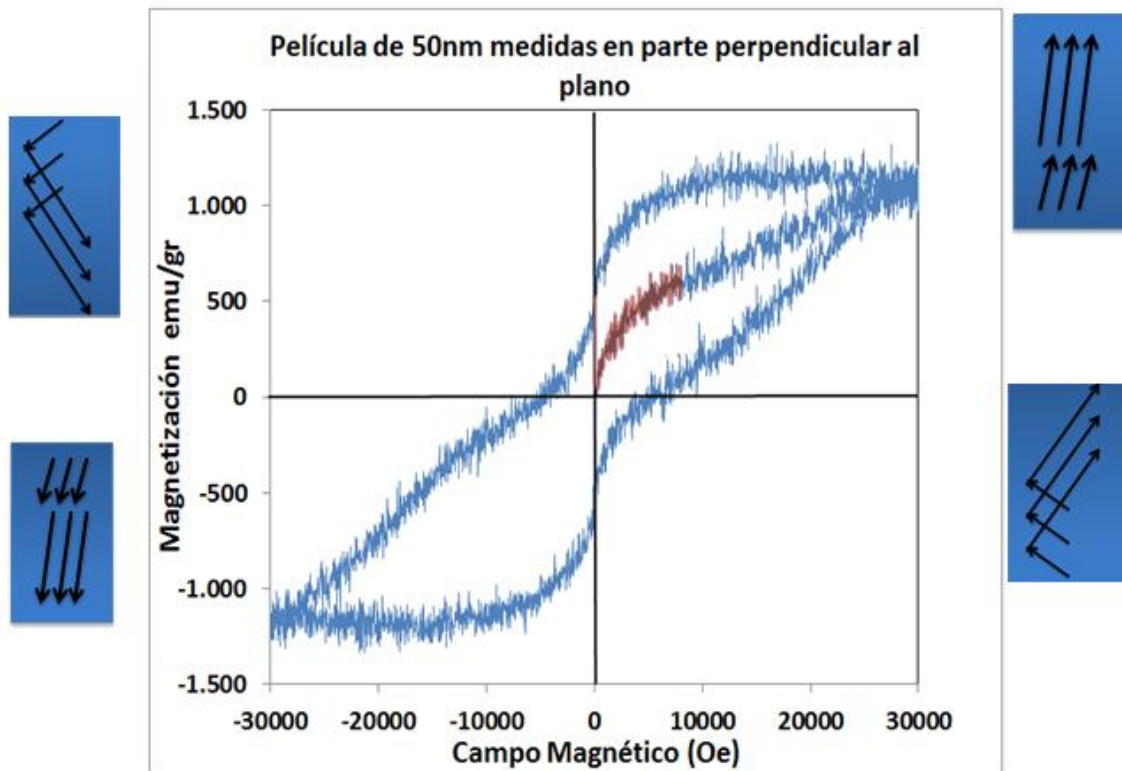


Figura 67 Gráfica de película de 50nm medida en el campo perpendicular

Para la aplicación del campo magnético perpendicular al plano, al alcanzar la magnetización de saturación, la orientación magnética es aproximadamente vertical. Cuando se cesa la aplicación del campo, al cruce por el eje +y (porción ferrimagnética), cambia la orientación, paralela al plano. Al aplicarse el campo con polaridad inversa, se mantiene la orientación paralela pero cambiando la dirección. Poco después se sale de la orientación paralela y al llegar a la magnetización de saturación ferrimagnética negativa, la orientación vuelve a ser aproximadamente vertical. Al dejarse de aplicar el campo magnético inverso (para el segundo semi-ciclo) se repite lo que sucedió en el primer semi-ciclo pero con las direcciones contrarias.

## 9. CONCLUSIONES

- Se elaboraron las películas delgadas con espesores de 2 a 50 nm bajo la técnica de erosión catódica. Emplear esta técnica permitió obtener los espesores y composición deseados.
- Mediante energía dispersa de rayos X (EDS), se determinó la composición las películas, que es de Mn=74.5% y Ga=25.5%
- Con las películas elaboradas, se determinó, mediante difracción de rayos X (XRD) que hasta espesores de 10 nm la fase es tetragonal, mientras que para un espesor de 50 nm, existe tanto la fase tetragonal como la hexagonal
- Usando microscopía de fuerza atómica (AFM), se encontró la cinética de crecimiento de grano. Sobre la superficie del SiO<sub>2</sub> nuclea la fase tetragonal
- A partir de cierto espesor nuclea la fase hexagonal
- Se determina que, en las películas realizadas para el espesor de 2 nm, se obtuvo una mayor magnetización en el campo perpendicular a la muestra.
- En el tamaño de 50 nm, muestra una parte ferrimagnética atrapada en otra parte antiferromagnética mostrando una menor capacidad magnética.

## 10.REFERENCIAS

- [1] Sánchez, T. (s.f.). Nanociencia y Nanotecnología: la *Tecnología Fundamental del siglo XXI*.
- [2] Poratti, G. G. (2010). Los próximos 500 años ¿Cómo evolucionaran las casas, computadoras, automóviles, industrias, y robots del futuro? Buenos Aires: Red Universitaria.
- [3] Williams, M. E. (s.f.). Microelectrónica y semiconductores. Obtenido de <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo3/83.pdf>
- [4] <http://www.aragoninvestiga.org/Eespíntronica-el-control-del-eespín/>
- [5] Vardeny, Z. V. (2010). *Organic Spintronic*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- [6] <http://ina.unizar.es/docs/cen139/contenido2.html>
- [7] Schaefer, H.-E. (2010). Nanoscience: The Science of the Small in Physics, Engineering, Chemistry, Biology and Medicine. En H.-E. Schaefer, *Nanoscience: The Science of the Small in Physics, Engineering, Chemistry, Biology and Medicine* (págs. 461-462). Stuttgart: Springer.
- [8] <http://searchstorage.techtarget.com/definition/MRAM>
- [9] Richarte, J. (2012). Motherboards. En J. Richarte, *Motherboards* (págs. 67-75). Buenos Aires: Fox Andina, Dalaga.
- [10] <http://www.gizmag.com/mram-universal-memory/30261/>
- [11] Tang, D. D. (2010). *Magnetic Memory: Fundamentals and Technology*. New York: Cambridge University Press.
- [12] [http://www.ibm.com/developerworks/community/blogs/InsideSystemStorage/entry/albert\\_fert\\_and\\_peter\\_gruenberg?lang=en](http://www.ibm.com/developerworks/community/blogs/InsideSystemStorage/entry/albert_fert_and_peter_gruenberg?lang=en)

- [13] Hirota, E. (2002). *Giant Magneto-Resistance Devices*. Berlin: Springer.
- [14] Jiang, Z. (2009). Magnetic Content Addressable Memories. En Z. Jiang, *Magnetic Content Addressable Memories* (págs. 29-30). Ann Arbor, MI: UMI Micriform.
- [15] Kurinec, S. K. (2010). Nanoscale Semiconductor Memories: Technology and Applications. En S. K. Kurinec, *Nanoscale Semiconductor Memories: Technology and Applications* (pág. 236). Boca Raton, FL: CRC Press.
- [16] Ralph, D. (2007). *Spin transfer torques*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1197-1198.
- [17] Hübscher, H. (1991). Materiales magnéticos. En H. Hübscher, *Electrónica curso elemental* (págs. 281-283). Barcelona: Editorial Reverté.
- [18] Hlawiczka, P. (1977). Ferrimagnetismo. En P. Hlawiczka, *Introducción a la Electrónica Cuántica* (págs. 381-384). Barcelona: Editorial Reverté.
- [19] Coey, M. D. (2011). *High spin polarization in epitaxial films of ferrimagnetic Mn<sub>3</sub>Ga*. PHYSICAL REVIEW.
- [20] Groover, M. P. (1997). Crecimiento física de vapor. En M. P. Groover, *Fundamentos de Manufactura Moderna. Materiales, procesos y sistemas*. (págs. 828-830). México: Prentice-Hall Hispanoamericana.
- [21] Martín, J. M. (2003). Crecimiento mediante pulverización catódica. En J. M. Martín, *Láminas delgadas y recubrimientos: preparación, propiedades y aplicaciones* (págs. 147-167). Madrid: CSIC.
- [22] Thomas, M. T. (1979). Vacuum sputter deposition. En . K. L. Marton, *Vacuum Physics and Technology* (págs. 556-563). New York: Academic Press.
- [23] Francis W. Sears, M. W. (2004). Óptica. En M. W. Francis W. Sears, *Física Universitaria* (págs. 1383-1386). México: Pearson Educación.
- [24] [http://www.scai.uma.es/servicios/area\\_microscopia/afm/afm.html](http://www.scai.uma.es/servicios/area_microscopia/afm/afm.html)

[25] <http://www.upv.es/entidades/SME/info/753337normalc.html>

[26] <http://www.uned.es/cristamine/mineral/metodos/sem.htm>

[27] Nin, G. V. (2000). Microscopía electrónica de barrido. En G. V. Nin, *Introducción a la Microscopía Electrónica Aplicada a Las Ciencias Biológicas* (págs. 105-107). México: Fondo de Cultura Económica.