

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Fabricación de películas delgadas de
compuestos $\text{Co}_{100-x}\text{-Cu}_x$ ($x = 0, 5, 10, 20, 30$),
caracterización estructural y magnética, y
análisis de su anisotropía magnética



Grado en Ingeniería
en Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

Fermín Lumbreras Ederra

Cristina Favieres Ruiz

José Vergara Platero

Pamplona, 06/09/2017

RESUMEN:

Para la elaboración de este Trabajo de Fin de Grado, se han fabricado películas delgadas, de espesor comprendido entre ≈ 30 y ≈ 100 nm, por deposición con láser pulsado, PLD. La variación de la composición se ha logrado por medio de la utilización de blancos, sobre los que incide el láser, compuestos de Co y Cu, consiguiendo así la generación de plasma mixto de dos elementos. La caracterización estructural se ha realizado por medio de difracción de rayos X, en el modo de incidencia rasante, y la caracterización magnética utilizando el efecto Kerr transversal magnetoóptico, MOKE, y la medida mediante magnetómetro de muestra vibrante, VSM. Se ha prestado especial atención a la medida y seguimiento de su anisotropía magnética, inducida mediante y durante el proceso de obtención.

ABSTRACT:

In order to elaborate this work, thin films have been made, with thicknesses between ≈ 30 and ≈ 100 nm, by pulsed laser deposition, PLD. The variation of the composition has been obtained by means of targets, in which a laser incises, composed by Co and Cu, achieving the generation of mixed plasma of the two elements. The structural characterization has been done by X-ray diffraction, in the grazing incidence mode, and the magnetic characterization using the transversal magneto-optic Kerr effect, MOKE, and the measuring through vibrating sample magnetometer, VSM. Special attention has been put on the measuring and tracing of their magnetic anisotropy, induced through and during de obtaining process.

Palabras clave:

Compuestos magnéticos nano-cristalinos

Películas delgadas

Pulsed Laser Deposition, PLD

Caracterización magnética: Anisotropía magnética

Índice

I.	Introducción.....	11
I.1.	Estudios previos	11
I.2.	Objetivos	13
II.	Fabricación por PLD	15
II.1.	Láser y sistema óptico.....	16
II.2.	Cámara de alto vacío.....	18
II.2.1.	Equipo de vacío.....	18
II.2.2.	Target	19
II.2.2.1.	Obtención del target de Co y Cu.....	20
II.2.2.2.	Componentes del conjunto del target en la instalación PLD	21
II.2.3.	Substratos	21
II.2.3.1.	Soporte de depósitos oblicuos a la dirección del plasma.....	21
II.2.3.2.	Rotación de los substratos y posición en la cámara	23
II.2.4.	Obtención	24
II.2.4.1.	Preparación de la cámara de vacío	24
II.2.4.2.	Generación del plasma y depósito en los substratos	25
III.	Estudio de la estructura.....	29
IV.	Comportamiento magnético	33
IV.1.	VSM	33
IV.1.1.	Fundamento	33
IV.1.2.	Descripción.....	33
IV.2.	MOKE	38
IV.2.1.	Fundamento	38
IV.2.2.	Descripción.....	38
IV.3.	Medida de la anisotropía o de la isotropía magnética	42
V.	Resultados.....	49

V.1. Resultados estructurales.....	49
V.2. Resultados sobre el comportamiento magnético	53
V.2.1. Comportamiento magnético VSM.....	53
V.2.1.1. Películas delgadas PLD con deposición normal, $\theta = 0^\circ$	54
V.2.1.2. Películas delgadas PLD con deposición oblicua, $\theta = 55^\circ$	55
V.2.2. Comportamiento magnético MOKE.....	62
V.2.2.1. Películas delgadas PLD con deposición normal, $\theta = 0^\circ$	63
V.2.2.2. Películas delgadas PLD con deposición oblicua, $\theta = 55^\circ$	64
VI. Conclusiones y líneas futuras	67
VI.1. Conclusiones	67
VI.2. Líneas futuras	68
VII. Bibliografía.....	69

I. Introducción

I.1. Estudios previos

Se denomina película delgada a una estructura con una de sus tres dimensiones del orden de nm, considerada, por lo tanto, un elemento de dos dimensiones. Debido a su versatilidad y gran potencial en el mundo de la ingeniería, las películas delgadas llevan décadas cobrando vital importancia en aplicaciones industriales, más concretamente, en aplicaciones magnéticas [1-8].

De los numerosos métodos existentes para fabricar películas delgadas, resultan de gran interés aquellos en los que es utilizado un láser. Por lo tanto, conviene remontarse a sus orígenes: al poco de que el primer láser altamente energético de rubí fuese desarrollado, en 1960, comenzó una época llena de estudios teóricos y experimentales acerca de la interacción de impactos de láseres intensos contra superficies sólidas [9, 10], líquidas [11] y materiales gaseosos [12].

Las películas delgadas fabricadas anteriormente en el Laboratorio de Magnetismo, del Departamento de Física (Universidad Pública de Navarra), han sido obtenidas mediante la técnica de fabricación ha sido la deposición mediante un láser pulsante (a partir de ahora PLD, cuyas siglas provienen del inglés “Pulsed Laser Deposition”). Conviene, por lo tanto, resumir brevemente su funcionamiento.

Se dispone de una cámara de alto vacío, en la que se encuentran, por un lado, un soporte para sujetar un target del material que se quiere hacer la película delgada y, por otro lado, un soporte en el cual se colocan los substratos en los que se depositan las películas delgadas. Un láser de alto poder energético es utilizado para impactar en el material del target, generando así un plasma que se deposita en los substratos, creando películas delgadas. El plasma incide o bien de forma normal sobre el substrato, o bien de forma oblicua. Esto depende de la geometría del porta-substratos utilizado y en la dirección en la que el plasma incide en los substratos.

Este sistema es tan flexible que, puede adaptarse a numerosas situaciones de trabajo, pudiéndose incluso generar películas delgadas en un entorno gaseoso, habiendo sido inyectado externamente, o incluso combinándolo con otros tipos de fuente de evaporación de materia, creando un sistema híbrido. Para la elaboración de las películas delgadas presentes en este trabajo, sin embargo, se trabajará con la cámara en vacío, con valores en torno a 10^{-5} - 10^{-6} mbar.

Para la realización de este trabajo, se han fabricado películas compuestas por Co y Cu, en distintas proporciones. Resulta de gran interés analizar el comportamiento magnético de cada película delgada, puesto que se tiene, por un lado, un material ferromagnético como lo es el Co y, por otro lado, un material diamagnético como lo es el Cu. Además, dado que dichos materiales son inmiscibles, investigar su respuesta frente a campos magnéticos externos posee un alto grado de interés [13].

El sistema utilizado en este trabajo es muy particular, ya que, según haya sido el tipo de deposición, se tienen películas delgadas cuya materia está distribuida de forma isotrópica (deposiciones normales) o películas delgadas cuya materia está distribuida en forma de nano-láminas. Para esto último, es la primera vez que se logra [14]. Lo expuesto en este párrafo se encuentra esquematizado en la *Figura I-1*:

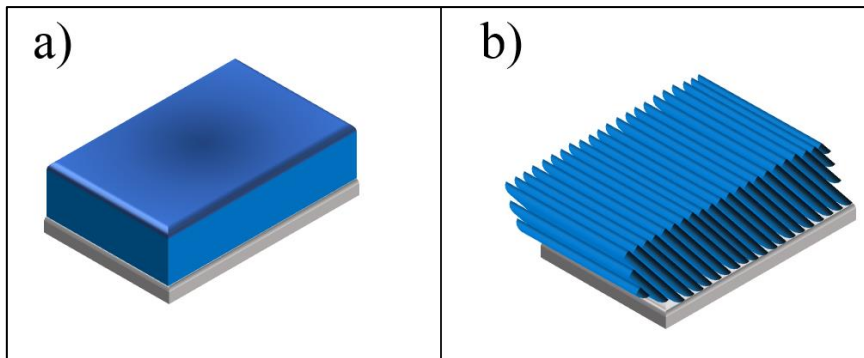


Figura I-1: Esquemas en tres dimensiones de las películas delgadas (en color azul) sobre un sustrato (en color gris), mediante PLD. En a), se representa una película delgada fabricada por deposición normal, mientras que en b), una película delgada fabricada con deposición oblicua.

En la *Figura I-1* se representa de forma clara la forma que adquieren las películas delgadas, según haya sido su deposición: si ha sido normal (*Figura I-1, a*), presenta una distribución isotrópica, mientras que, para una deposición oblicua (*Figura I-1, b*), la película delgada está formada por nano-láminas. Este aspecto de las películas delgadas es fundamental, ya que confiere anisotropía uniaxial en el plano de las películas delgadas [14].

I.2. Objetivos

Este trabajo de fin de grado tiene dos objetivos fundamentales:

1. Fabricación de películas delgadas ferromagnéticas de compuestos $\text{Co}_{100-x}\text{-Cu}_x$ ($x = 0, 5, 10, 20$ y 30), mediante PLD.
2. Caracterizaciones:
 - 2.1. Caracterización estructural de las películas delgadas, mediante rayos-X.
 - 2.2. Caracterización magnética, para así poder comprobar que en las películas delgadas depositadas oblicuamente se ha inducido una anisotropía uniáxica en el plano de la película, y su evolución para diferentes cantidades de Cu en las películas delgadas, mediante:
 - 2.2.1. VSM.
 - 2.2.2. MOKE.

II. Fabricación por PLD

Mediante la técnica de deposición por láser pulsado (PLD, por sus siglas en inglés, tal y como se ha comentado anteriormente), se puede sintetizar una inmensa cantidad de materiales debido a su alta reproducibilidad estequiométrica y versatilidad. Para la elaboración de las muestras de este trabajo, de todos los parámetros que constituyen esta técnica solo se ha variado, de una muestra a otra, las cantidades de Co y Cu.

Todas las películas delgadas presentes en este trabajo han sido fabricadas con el profesor Vicente Madurga. Él ha sido quien ha realizado los cálculos y pruebas previas para fijar los parámetros que se han utilizado, sin variar en momento alguno, para la fabricación de todas y cada una de las películas delgadas.

El proceso de PLD consiste en focalizar un haz láser pulsado en el blanco, el cual es el target formado por Co y sectores de Cu (para las muestras que se utilice Cu), para así conseguir su ablación; así, debido a este impacto del láser, se forma un plasma que se deposita en los sustratos colocados frente al target, enfriándose a alta velocidad.

El conjunto target-sustrato se encuentra dentro de una cámara de vacío. Es clave para que, tanto el impacto del láser en el target, como la propagación del plasma del target al sustrato sean lo más limpios posibles y evitar la oxidación de las muestras. Tanto el target como los sustratos están sujetos por sus respectivos soportes (porta-target y porta-sustratos, respectivamente); ambos estarán girando, para tener un reparto homogéneo de materia en los sustratos.

La máxima de este apartado consiste en describir todos los elementos que conforman este sistema de fabricación de películas delgadas. Conviene resaltar lo importante que es que cada uno de los componentes del circuito trabaje para cada muestra respetando los mismos parámetros, para que después puedan compararse las muestras en base a su diferente concentración de Co y Cu.

II.1. Láser y sistema óptico

Láser: Se trabaja con un láser comercial, de la casa *Litron Lasers* modelo *TRLiG 400-20*. El dispositivo de emisión es Nd-YAG ($\lambda = 1064$ nm, duración de pulso de 6 ns, ratio de repetición de 20 Hz, y salida máxima de 400 mJ). Para la elaboración de todas las películas delgadas presentes en este trabajo, las condiciones de trabajo son las mismas, siendo la energía emitida por el láser de 400 mJ/pulso .

Prisma: Se trata de un prisma triangular. Se utiliza para reducir energía del láser y desviar el haz por reflexión total; a la cámara llega el 0.5 – 0.6 del haz generado, para que en el target impacte una porción menor de energía a la generada.

Lente: Entre el prisma triangular y la entrada a la cámara de vacío, se encuentra una lente convergente que focaliza el haz. Es de tipo biconvexa, con distancia focal de 500 mm. Todas las muestras han sido hechas a una distancia entre la lente y el target de 345 mm, en el eje del sistema óptico.

Ventana de cuarzo: Entrada del láser en la cámara una vez que ha sido focalizado por la lente. Debe estar lo más limpia posible antes de cada depósito, para poder tener una transmisividad próxima al 100%; es por eso que es limpiada con metanol antes de cada depósito. Una vez que el láser entra en la cámara, este incide con un ángulo de 45° con respecto al target.

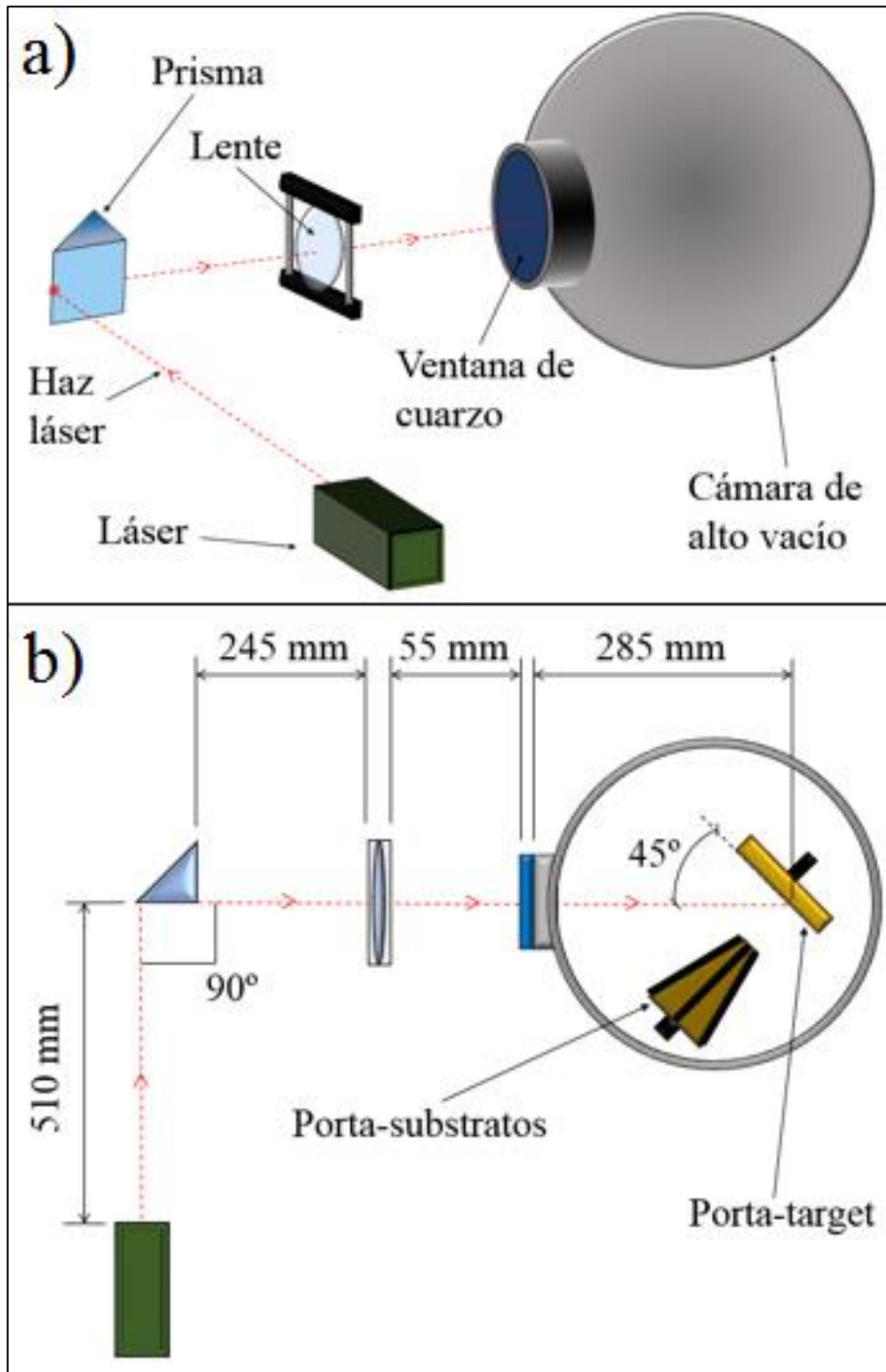


Figura II-1: Esquemas del conjunto formado por el láser y el sistema óptico utilizado en el Laboratorio de Magnetismo (Departamento de Física, Universidad Pública de Navarra). En a) se representa el sistema en 3 dimensiones, mientras que en b) se muestra el sistema en el plano de la trayectoria del haz láser, en 2 dimensiones; en él se muestra la disposición del interior de la cámara de alto vacío, así como la incidencia del haz láser sobre el target.

II.2. Cámara de alto vacío

Se trabaja con una cámara esférica de alto vacío, de la casa *Kurt J. Lesker*. En esta cámara se han añadido modificaciones por investigadores del Laboratorio de Magnetismo del Departamento de Física, de la Universidad Pública de Navarra. A destacar, los pasamuros que han agregado a la estructura: permiten comunicar fuentes de energía que permanecen fuera de la cámara con accionamientos instalados dentro de ella, permitiendo en todo momento trabajar en alto vacío.

Los accionamientos mencionados en el anterior párrafo son dos pequeños motores de corriente continua, que son alimentados por fuentes de energía que se encuentran fuera de la cámara de vacío. Aquí reside la trascendencia de los pasamuros: gracias a su diseño, el cableado que comunican los motores con sus respectivas fuentes puede realizarse sin perder el vacío de la cámara.

Cada motor tiene un eje para que puedan encajarse el porta-substratos y el porta-target. De esta manera, pueden rotar a una velocidad constante durante la fabricación de películas delgadas.

Además, las conexiones con las cámaras de vacío para la extracción de partículas, para obtener un nivel de vacío aceptable, han sido diseñadas por el profesor Vicente Madurga. Se usan dos orificios de la cámara como vía de acceso para bombas de obtención de vacío: una bomba rotatoria y una bomba turbo-molecular.

II.2.1. Equipo de vacío

- 1) **Bomba rotatoria:** También llamada “bomba de caudal”, es utilizada para la primera etapa de obtención de vacío. Trabaja una vez que la cámara se cierra (también la válvula de la turbo-molecular) y se tiene una presión inicial igual a la atmosférica. Una vez que la cámara llega a una presión del orden de 10^{-2} mbar, la contribución de esta máquina empieza a ser baja. La utilizada en este trabajo es de la casa *Telstar*, cuyo caudal es de $9 \text{ m}^3/\text{h}$.
- 2) **Bomba turbo-molecular:** Esta otra bomba es utilizada para obtener alto vacío, de la marca *Pfeiffer-Vacuum*. Funciona a revoluciones superiores (1500 Hz), y solo comienza a funcionar una vez que se tiene un nivel de vacío mínimo; por esto la labor previa de la bomba rotatoria es imprescindible. Para que llegue al nivel de vacío deseado, que es del orden de 10^{-6} mbar, ha de estar entre 4 y 5 horas generando vacío.

- 3) **Medidor de vacío:** La bomba turbo-molecular incluye un sensor de presión, el cual obtiene información sobre el nivel de vacío de la cámara (presión del interior de la cámara de vacío, en mbar).

II.2.2. Target

Del inglés “objetivo”, se trata del material en el que impacta el láser, tras entrar por la ventana de cuarzo, para generar el plasma que después se deposita en los substratos. El target está sujeto por un porta-target diseñado por el profesor Vicente Madurga, que se explica más detalladamente a lo largo de este apartado. Su función es doble: por un lado, permite ajustarse al eje del motor eléctrico mencionado en el apartado referente al “equipo de vacío”, y, por otro lado, sujetar de forma correcta el target para que pueda rotar sin desprenderse de él.

En este trabajo se han utilizado tres tipos de target, tal y como se representa en la *Figura II-2*.

- 1) Target de Co puro (*Figura II-2, a*).
- 2) Target de Cu puro (*Figura II-2, b*).
- 3) Target de Co con sectores de Cu (*Figura II-2, c*). En esta arquitectura, se añaden sectores de Cu sobre un target de Co. Dependiendo de la cantidad de Cu que quiera utilizarse, dicho sector de Cu tendrá distinta superficie; en este trabajo, al indicar los compuestos $\text{Co}_{100-x}\text{-Cu}_x$, los subíndices hacen referencia a la proporción de cada elemento en la superficie del target a la hora de hacer el depósito. Concretamente, “x” es el porcentaje en área de Cu en la superficie del target.

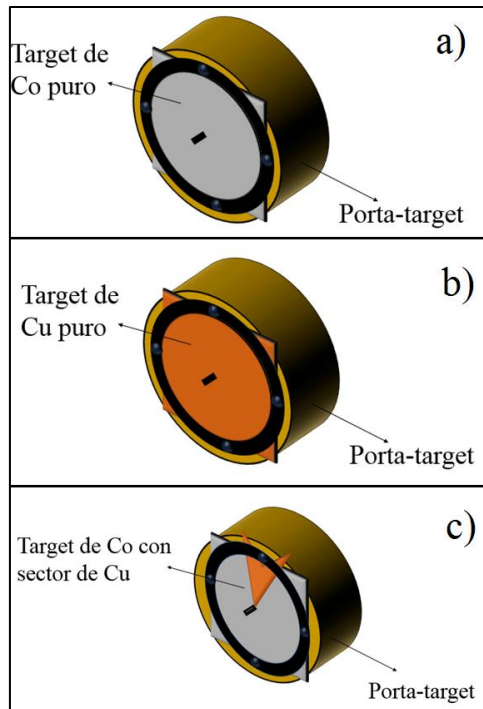


Figura II-2: Esquema en tres dimensiones del conjunto de targets sujetos por el porta-target utilizado en el trabajo.

II.2.2.1. Obtención del target de Co y Cu

Para la elaboración del target, se parte de láminas de Co y Cu comerciales. Ambas son de la casa *Goodfellow*, con una pureza del 99.9% y dimensiones de $100 \times 100 \text{ mm}^2$. En el caso del Co, la lámina tiene un espesor de 1.0 mm, mientras que para la lámina de Cu es de 0.5 mm.

De estas láminas de $100 \times 100 \text{ mm}^2$ se obtienen láminas más pequeñas, de $25 \times 25 \text{ mm}^2$. Se logran mediante una sierra de diamante, empapada con aceite, a bajas revoluciones, tanto el Co como el Cu. De esta manera, no se introducen tensiones a la hora de hacer el corte.

Después de recortar las láminas, se agujerea el centro del target obtenido con un taladro manual, de unos pocos milímetros de diámetro, para que se quede bien centrada en el porta-target. Para obtener los sectores de Cu, se recortan con la forma que se muestra en la *Figura II-3, c)*; es así como se obtiene la porción de Cu que se tiene con respecto a la superficie total que el láser impacta.

Finalmente, se lija de una forma progresiva la superficie en la que el láser más tarde incide, con una lija al agua de 600. De esta manera, se inician los depósitos con la superficie del target en las mismas condiciones.

II.2.2.2. Componentes del conjunto del target en la instalación PLD

- 1) **Porta-target:** Elemento diseñado por el profesor Vicente Madurga. Tal y como se comenta anteriormente, cumple dos funciones: por un lado, sujetar el target utilizado, y, por otro lado, poder ajustarse al eje de la máquina de corriente continua que es añadida a la cámara de alto vacío. Así, el conjunto puede ser rotado sin riesgo de que el porta-target se caiga del soporte durante el proceso de fabricación de películas delgadas. El target queda orientado con una posición tal que el ángulo que forma la dirección en la que incide el láser con la normal de la superficie del target es de 45° .
- 2) **Motor de corriente continua:** Se trata de un accionamiento añadido a la cámara de vacío por los investigadores del Laboratorio de Magnetismo, del Laboratorio de Física. Es un motor eléctrico, en cuyo eje se sujeta el soporte del porta-target. Es alimentado por una fuente dc, a través del pasamuros de la cámara. La velocidad de rotación del porta-target (32 rpm) ha sido la misma para la fabricación de todas las películas delgadas, y es específica para este trabajo.
- 3) **Fuente dc:** Elemento gracias al cual el motor gira, haciéndolo también, de forma solidaria, el porta-target.

II.2.3. Substratos

Se trata de los materiales portaobjetos en los que se deposita el plasma. Se trabaja con 2 tipos de substratos: vidrios cubreobjetos y monocristal de Si (111).

- 1) **Vidrios cubreobjetos:** Son de forma circular, con 7 mm de diámetro y 0.15 mm de espesor. Las muestras obtenidas sobre estos substratos son para realizar las caracterizaciones magnéticas. Con esta disposición se logran dos objetivos fundamentales: uno, al ser el vidrio tan delgado, la señal magnética que se mide en VSM es despreciable (el vidrio es un material diamagnético); y dos, al tener geometría circular, se elimina la anisotropía de forma.
- 2) **Monocristal de Si (111):** Se utiliza para hacer el análisis de rayos - X de las películas delgadas. Es un rectángulo de $20 \times 8 \text{ mm}^2$.

II.2.3.1. Soporte de depósitos oblicuos a la dirección del plasma

Se trata de un soporte diseñado por el profesor Vicente Madurga. Gracias a labores de investigación previas [15], su geometría permite que se genere una anisotropía uniáxica en el plano en las películas delgadas. Se representa esquemáticamente en la *Figura II-3*.

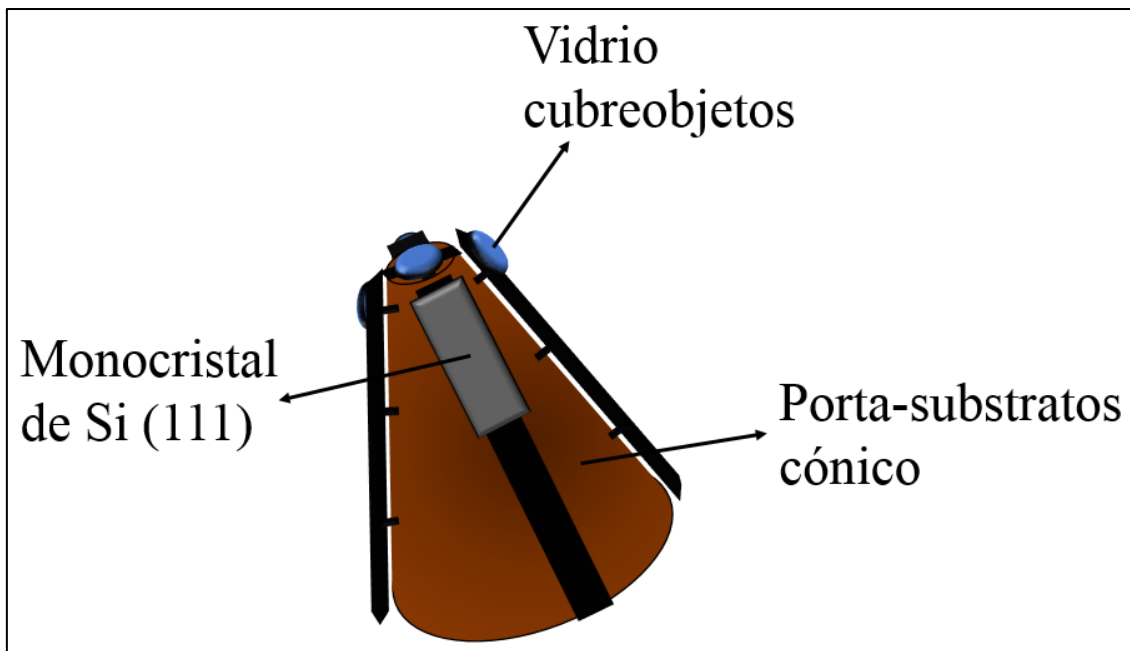


Figura II-3: Esquema en tres dimensiones del conjunto formado por el porta-substratos cónico y los substratos.

De forma cónica, este soporte está formado por 4 generatrices principales, a lo largo de las cuales se podrían poner varios substratos, y una superficie circular en el extremo que quedaría perpendicular al plasma, de modo y manera que permite hacer, simultáneamente, varios depósitos oblicuos y uno normal (*Figura II-3*).

El porta-substratos cónico ocupa una posición en la cámara de alto vacío tal que el eje del cono es paralelo a la dirección del plasma. La geometría del cono hace que el ángulo de incidencia del plasma con respecto a la normal de la generatriz del cono sea de 55° ; este aspecto es fundamental para que la anisotropía uniáxica de las muestras oblicuas sea la óptima [3, 7, 14, 15]. Para explicarlo de una manera más gráfica, se muestra más adelante la *Figura II-4*.

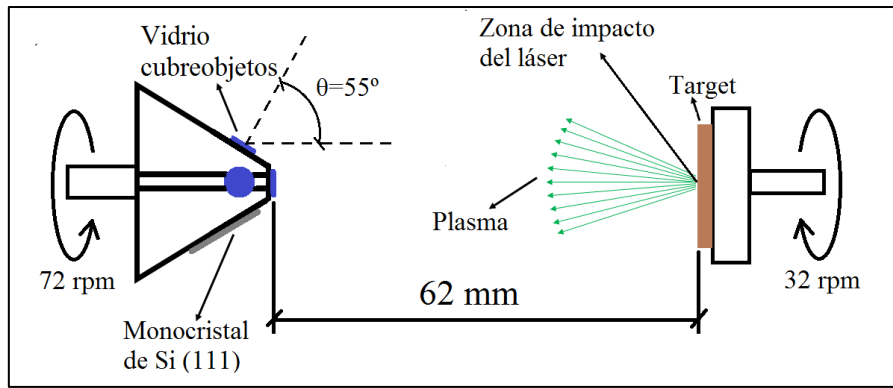


Figura II-4: Esquema en dos dimensiones de la disposición del cono porta-substratos y el porta-target a la hora de fabricar películas delgadas PLD, representado de forma esquemática. El eje del cono es paralelo a la dirección del plasma, mientras que el ángulo de incidencia del plasma sobre los substratos colocados en las generatrices del cono es de 55°.

En este soporte, se colocan 4 vidrios portaobjetos y un substrato de silicio, pegados con cinta adhesiva de doble cara. De esos 4 vidrios, uno de ellos se pone en el vértice del cono (cuyo plano es perpendicular al plasma), mientras que los otros 3 se colocan, cada uno, en una generatriz distinta; se colocan lo más cercano posible a la punta del cono, es decir, al substrato con incidencia normal. Nunca debe de sobrepasar un trozo de vidrio por encima de la superficie normal al plasma.

De esta manera, la cantidad de plasma que llegue será casi igual para todos (al de incidencia normal algo más). Lo mismo con el silicio rectangular; se coloca con su lado más largo paralelo a la generatriz, al final del cono, para que llegue una cantidad de materia similar a los substratos circulares.

Aunque en la *Figura II-4* no aparezca representada, se dispone de un accionamiento mecánico llamado “máscara”, el cual evita que se deposite plasma en los substratos durante las pruebas de impacto en el target. De esta manera, pueden hacerse pruebas de láser contra en target (para ver en qué punto del mismo impacta el láser), sin que se comience a depositar materia en los substratos. Se trabaja con ella de forma manual, con una manivela que se encuentra fuera de la cámara.

II.2.3.2. Rotación de los substratos y posición en la cámara

Para el cono porta-substratos se posee un accionamiento en la cámara de vacío similar a la del porta-target, en cuyo eje se puede ajustar el porta-substratos. Su fin es el mismo que en el caso del porta-target: que dicho eje rote a cierta velocidad constante, para que el soporte de los substratos lo haga de forma solidaria.

Tal y como se comenta en el anterior párrafo, la dinámica es análoga a la expuesta en el apartado correspondiente a la rotación del porta-target: un motor alimentado por una fuente de tensión DC, genera la rotación del porta-substratos, aplicando una tensión que equivale a una velocidad angular de 72 rpm.

En cuanto a la posición que ocupa en la cámara, recalcar lo que se ha comentado en el anterior apartado: el eje del cono coincide con la dirección del plasma, mientras que la normal de la generatriz forma 55° con respecto a la dirección del plasma (*Figura II-4*).

La distancia entre el centro del substrato circular de vidrio y el centro del target es de 62 mm (*Figura II-4*). Este es también un parámetro que permanece constante para la fabricación de todas las películas delgadas.

II.2.4. Obtención

Independientemente del porta-substratos que se utilice, se sigue el mismo procedimiento a la hora de montar los componentes necesarios y hacerlos funcionar para cada depósito. Se distinguen varias etapas:

II.2.4.1. Preparación de la cámara de vacío

- 1) Romper el nivel de vacío que tenga la cámara de vacío, para que la cámara esté a presión atmosférica.
- 2) Retirar la ventana de vidrio superior, junto con la junta tórica, y limpiar con metanol la ventana de cuarzo. De esta forma, se mantiene el funcionamiento óptico correcto, para que el láser atraviese de una forma óptima la ventana de cuarzo y entre en la cámara de vacío.
- 3) Introducir el porta-target y el porta-substratos cónico en la cámara, ajustándolos en sus correspondientes ejes., ya que es el objeto más pequeño. Se sujeta al eje del motor gracias al tornillo que incorpora.
- 4) Comprobar que ambos motores giren a sus velocidades estimadas: el motor cuyo eje sujeta al porta-target a 32 rpm y el motor cuyo eje sujeta al porta-substratos cónico a 72 rpm.
- 5) Comprobar que la distancia entre el porta-target y el porta-substratos cónico de vidrio es la que previamente ha sido definida: 62 mm. Tal y como se menciona en este apartado, este es un parámetro invariable a lo largo del trabajo.
- 6) Colocar la máscara de forma que los substratos queden protegidos durante la prueba de impacto que se realiza más adelante.

- 7) Cerrar la cámara.
- 8) Encender la rotatoria; esperar unos segundos antes de abrir la llave. Es necesario para evitar malfuncionamientos.
- 9) Encender la turbo-molecular. En los instantes iniciales, se encuentra aislada de la cámara; hay que esperar a que haya un nivel mínimo de vacío para que empiece a generar vacío.
- 10) Una vez que la cámara llegue a niveles de vacío de 10^{-2} mbar, se activa la turbo-molecular. Aun así, la rotatoria ha de seguir generando vacío; conviven en funcionamiento hasta que se llegue a niveles de vacío superiores y la turbo-molecular trabaje sin necesidad de que la rotatoria ayude.
- 11) Apagar la rotatoria una vez que la turbo-molecular pueda generar vacío sin ayuda de la rotatoria. Durante el proceso de obtención de la película delgada, solo trabaja la turbo-molecular.
- 12) Una vez que se llega a presiones entre 10^{-5} - 10^{-6} mbar, se puede comenzar a hacer el depósito. Del anterior paso a este suelen pasar entre 4 o 5 horas, ya que la extracción de materia por parte de la turbo-molecular es más sutil, debido al minúsculo tamaño de partículas restantes en el interior de la cámara. Es imprescindible dejar a la turbo-molecular trabajar durante el depósito.

II.2.4.2. Generación del plasma y depósito en los substratos

Una vez que se tenga una presión admisible dentro de la cámara (10^{-5} - 10^{-6} mbar), se procede a la obtención del depósito con el láser. Resulta imprescindible trabajar con gafas especiales para proteger la vista, debido a la alta peligrosidad del láser.

A continuación, se explican los pasos a seguir para la obtención de la película delgada.

- 1) Ajustar los parámetros del láser antes de encenderlo. Como se ha descrito en el apartado correspondiente al láser y sistema óptico, el dispositivo de emisión es Nd-YAG ($\lambda = 1064$ nm, duración de pulso de 6 ns, ratio de repetición de 20 Hz, y salida máxima de 400 mJ). De nuevo, hay que recordar que, para todas las películas delgadas fabricadas, el láser emite $400 \text{ mJ}/\text{pulso}$. Estos parámetros son inamovibles.
- 2) Encender el láser, manteniendo imposibilitada su emisión durante 15 minutos.

- 3) Prueba de impacto; se activa la emisión del láser y se comprueba la correcta posición donde el láser va a impactar en el blanco (el target). Dicha trayectoria puede ser modificada mediante el prisma, ya que está un soporte que permite ser movido. Esta prueba es necesaria para quitar el óxido en la zona de impacto del target.
- 4) Limpieza del target; se tiene 1-2 minutos impactando el láser en el target para eliminar posibles contaminantes que haya en la superficie, pero sin retirar aun la máscara que protege los substratos del plasma generado.
- 5) Una vez concluido este proceso, se dispone a realizar el depósito. El tiempo de cada depósito es siempre de 30 minutos. Para este tiempo de depósito, el espesor de las películas es ≈ 70 nm.

Para concluir con este capítulo, se expone la *Figura V-5*. En ella se muestran las películas delgadas PLD obtenidas para un depósito en concreto: el del compuesto $\text{Co}_{95}\text{-Cu}_5$ (los subíndices corresponden al porcentaje de superficie ocupada por cada uno de los elementos en el target, a la hora de hacer el depósito).

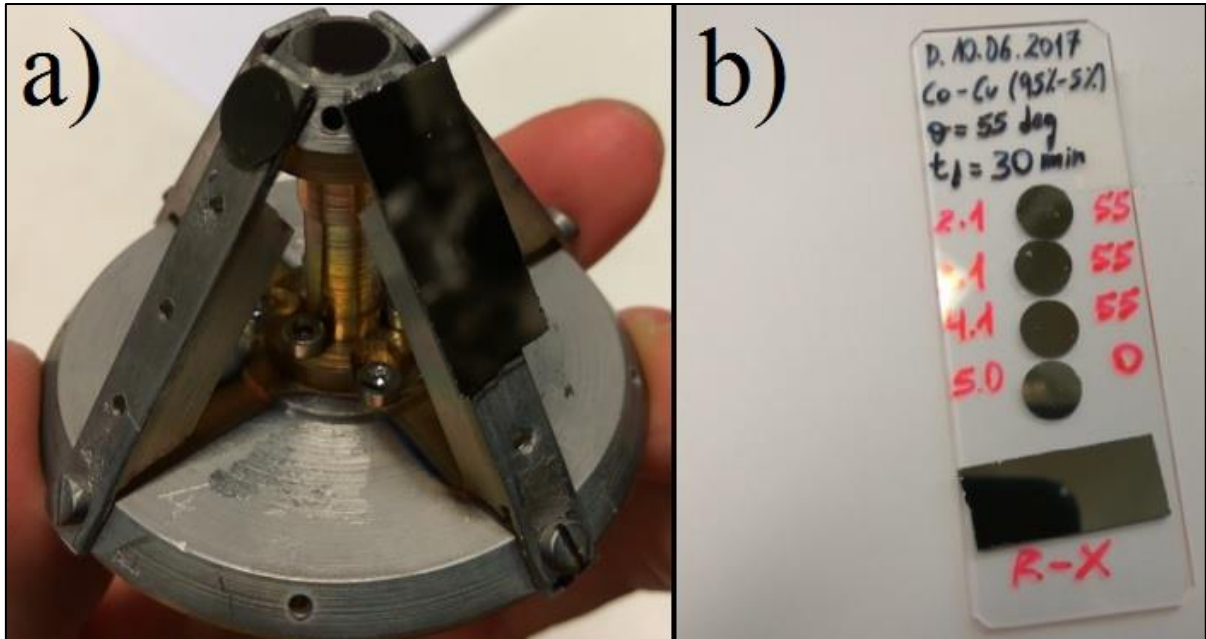


Figura II-5: Fotos sacadas al depósito obtenido para el compuesto $\text{Co}_{95}\text{-Cu}_5$ (los subíndices indican el porcentaje de superficie ocupada en el target de cada material), en el Laboratorio de Magnetismo, en el Departamento de Física (Universidad Pública de Navarra). En a) se muestra la disposición del porta-substratos cónico con las películas delgadas PLD recién fabricadas: con incidencia normal, la película que se encuentra en el vértice del porta-substratos, depositada sobre un vidrio cubreobjetos, que está sujetado, a su vez, con cinta adhesiva de doble cara.; con incidencia oblicua, en cambio, se encuentran las películas delgadas depositadas sobre tres vidrios cubreobjetos y sobre la lámina de Si (111), todas ellas sujetadas, con cinta adhesiva de doble cara, en cada una de las generatrices del porta-substratos, todas ellas situadas lo más cerca posible del vértice del cono. En b) se encuentran todas las muestras obtenidas para este depósito ordenadas e identificadas debidamente, una vez que han sido despegadas del porta-substratos.

III. Estudio de la estructura

Resulta de alto interés conocer la estructura cristalina de las películas delgadas obtenidas, así como de los targets de Co y Cu con los que se ha trabajado, puesto que, si se conoce dicha estructura, se tendrá más información sobre su comportamiento magnético [13]. Hay una clara relación estructura-magnetismo en el estudio de las películas delgadas, por lo que se busca determinar los planos cristalográficos de los materiales: la regularidad con que se sitúan, unos respecto de otros, los átomos o iones [16].

Para identificar cada sistema de planos cristalográficos, son utilizados los índices de Miller:

- a) **Co:** Estructura cristalina hexagonal (hcp); sus planos cristalinos (100), (002) y (101) se encuentran en los ángulos **2Theta** 41.6°, 44.5° y 47.4°, respectivamente.
- b) **Cu:** Estructura cristalina cúbica (fcc); en este caso, sus picos cristalinos son (111) y (200), y son para **2Theta** igual a 43.3° y 50.4°, respectivamente.

El ángulo en el que se encuentra cada plano de los dos elementos analizados es exclusivo del elemento del que ha radiado la luz. En este caso, estas posiciones son para la longitud de onda del Cu, que es el material emisor de la instalación de rayos-X.

Interesa saber la orientación de dichos planos cristalinos, en caso de que hubiese una estructura cristalina. El principio físico en el que se basa dicha determinación es la Ley de Bragg [16]. De un modo muy resumido, consiste en incidir un haz de rayos X en el material a estudiar, en varias direcciones. Para aquellas en las que se obtenga una interferencia constructiva de los rayos dispersados, corresponderá un plano cristalino.

En este trabajo, se han determinado los planos cristalinos de las muestras mediante un difractómetro comercial, de la casa *Seifert*. El esquema que representa los elementos más importantes de dicha instalación se encuentra representados en la *Figura III-1*.

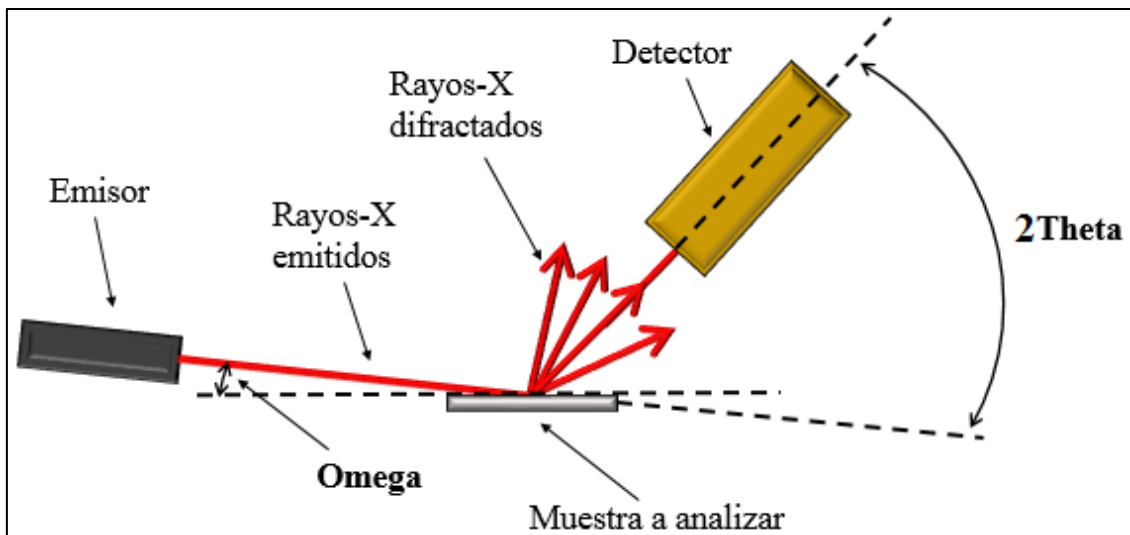


Figura III-1: Esquema en dos dimensiones de los componentes fundamentales de la instalación de medida por difracción de rayos-X: el emisor, el detector, la muestra a analizar, la trayectoria de los rayos-X emitidos y difractados, el ángulo que forma la incidencia rasante con el plano de la muestra (Omega) y el ángulo que forma la incidencia rasante con la dirección del detector (Theta).

Fundamentalmente, consiste en una emisión de rayos-X con incidencia rasante, manteniendo ese ángulo, llamado Omega, constante durante el análisis completo ($\Omega = 1^\circ$). Se trabaja con este ángulo de incidencia por las películas delgadas: su espesor es tan pequeño, que sólo con incidencias rasantes se puede captar una información válida.

Estos rayos-X emitidos, impactan en la superficie a analizar y ocurre un fenómeno de difracción. Para analizar la luz difractada, la cual posee información sobre la estructura cristalina de la muestra, se tiene un detector. Este elemento realiza un barrido gracias al cual puede captar los rayos-X difractados para distintos ángulos. Este es el grado de libertad de la instalación, el ángulo variable 2θ , el que forma el detector con la dirección de incidencia del haz emitido. Por esto se realizan medidas para diferentes direcciones, pudiendo obtener información de un amplio rango de direcciones de luz difractada.

Una vez llega el haz de luz difractado al detector, se filtra la señal mediante un monocromador secundario de grafito.

La *Figura III-2* que se encuentra a continuación, muestra en qué dirección se aplica el análisis de rayos-X para el caso de películas delgadas; en ella también se muestra el sustrato de Si monocristalino (111) sobre el que se encuentra depositada la película delgada.

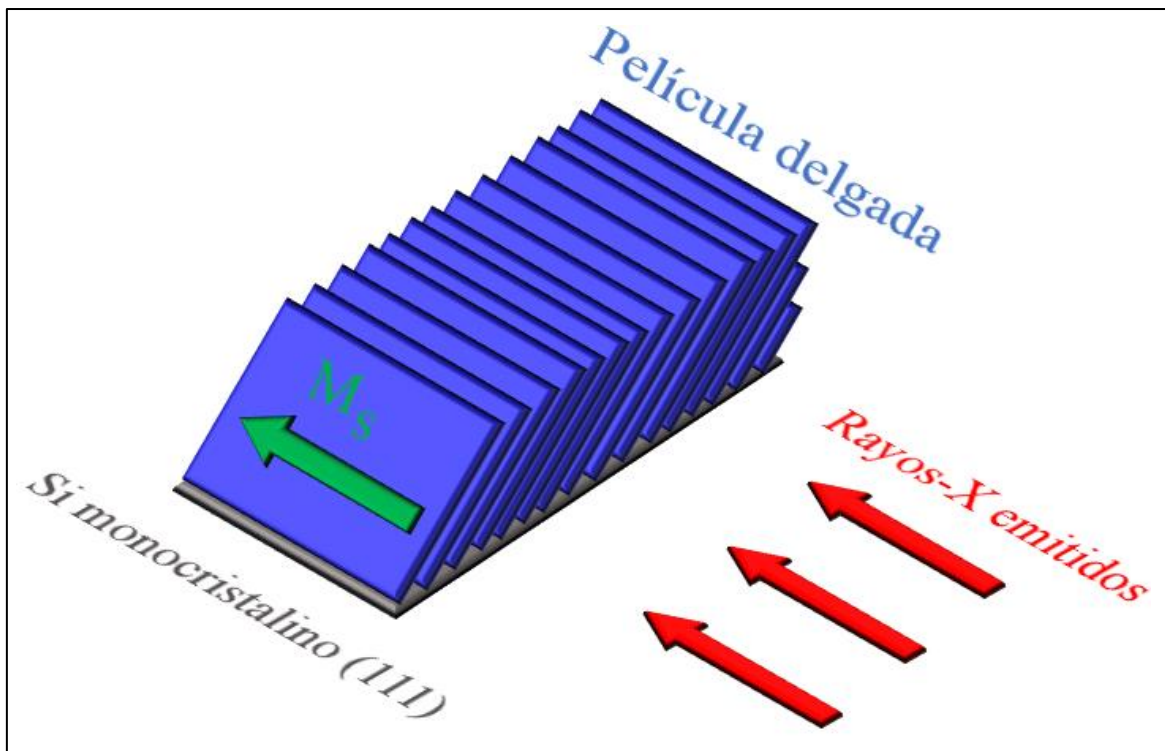


Figura III-2: Esquema en tres dimensiones de la dirección en la que los análisis de rayos-X son realizados para el caso de las películas delgadas (paralela a la dirección fácil de imanación de las películas delgadas). Aparece representado el sustrato de Si monocristalino (111) sobre el que se deposita la película delgada.

En lo referente al equipo, para todos los análisis ha mantenido todos los parámetros iguales: emisor de Cu para la emisión de rayos-X, monocromador secundario de grafito para filtrar, generador trabajando a 40 kV y 35 mA, con $\lambda_{Cu} = 0.1540598$ nm. Barridos para $20^\circ \leq 2\theta \leq 70^\circ$, medida hecha cada 0.1° con tiempos de medida de 28 segundos.

IV. Comportamiento magnético

IV.1. VSM

IV.1.1. Fundamento

El magnetómetro de muestra vibrante (VSM por sus siglas en inglés) se trata de un dispositivo de medida del momento magnético, que permite medir el ciclo de histéresis ($\mathbf{M-H}$). El sistema se compone de dos bloques fundamentales; por un lado, está la generación de una señal proporcional al campo magnético \mathbf{H} y su correspondiente medida. Por otro lado, se encuentra la generación de otra señal proporcional al momento magnético \mathbf{m} y su correspondiente medida.

IV.1.2. Descripción

El sistema utilizado en este trabajo se basa en la cabeza comercial *EG&G*. La disposición de los demás componentes en el circuito mostrado a continuación, de forma esquemática (*Figura IV-1*), ha sido diseñado por investigadores del Laboratorio de Magnetismo, del Departamento de Física de la Universidad Pública de Navarra.

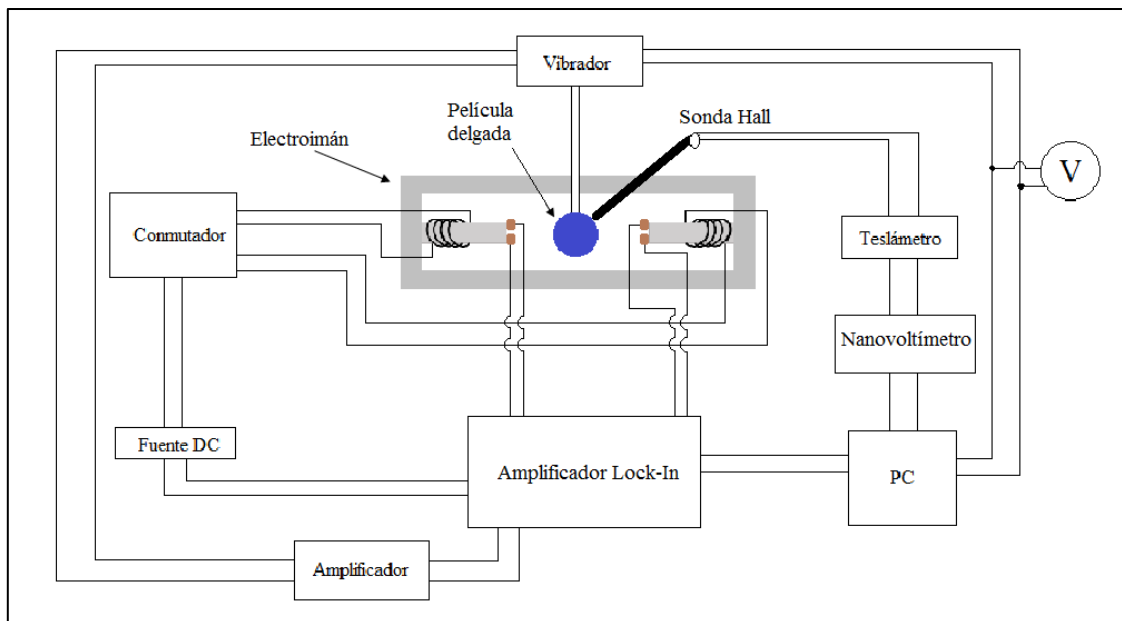


Figura IV-1: Esquema del circuito eléctrico de la instalación de VSM.

Utilizando un electroimán, con núcleo de Co-Fe aleado y rodeado por un bobinado de Cu (alimentado por una fuente DC) como fuente generadora de un campo magnético constante y uniforme (\mathbf{H}), la muestra a analizar se coloca en el gap (entrehierro) del circuito magnético, con su superficie en la dirección del campo magnético. Dicha muestra está sujeta por una varilla, la cual está conectada a un vibrador, que produce un

movimiento armónico en el eje vertical (la dirección perpendicular al campo magnético). Para obtener el momento magnético de la muestra, se tienen 4 bobinas captadoras, que han sido diseñadas por investigadores de la Universidad Pública de Navarra.

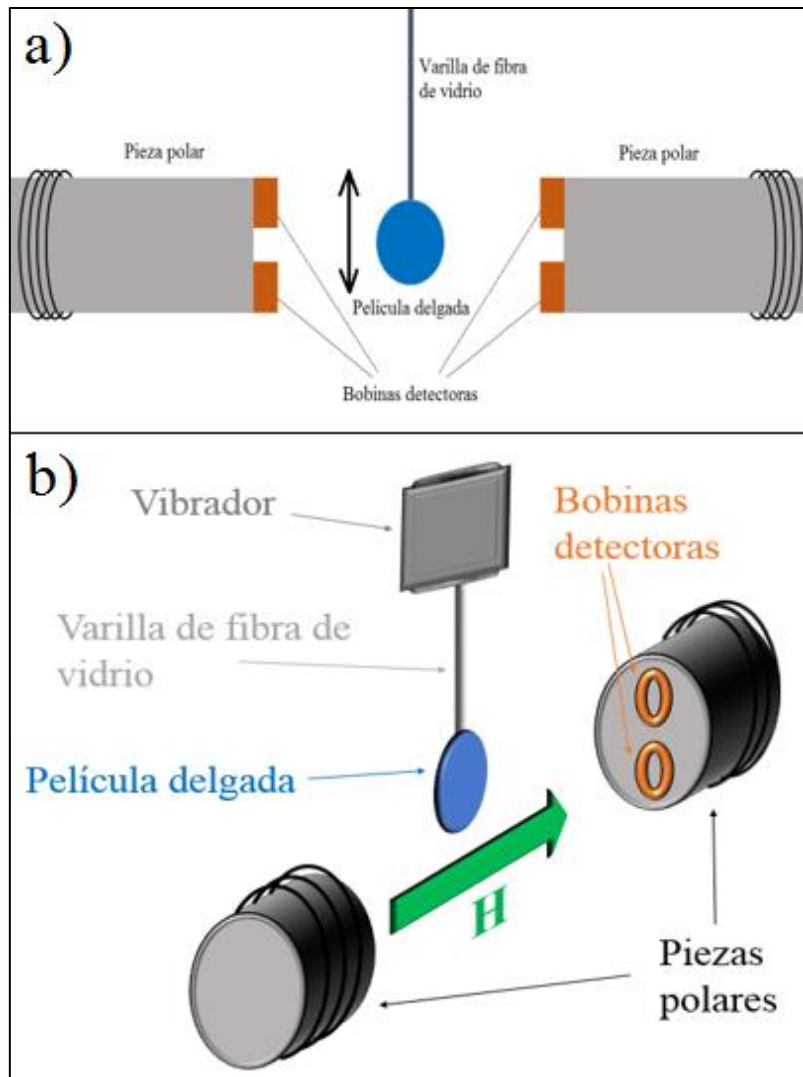


Figura IV-2: Esquemas del conjunto de generación del campo magnético constante y uniforme \mathbf{H} , conjunto de soporte y generación del movimiento armónico de la película delgada y conjunto de detección del flujo variable. En a) se representa el conjunto en 2 dimensiones, destacando las 4 bobinas detectoras y la dirección del movimiento armónico de la varilla de fibra de carbono. En b), se representa el conjunto en 3 dimensiones, destacando la dirección del campo magnético constante y uniforme \mathbf{H} y el vibrador.

Al imanarse la película delgada, en ella habrá un campo magnético tal y como indica la ecuación (IV.1):

$$\mathbf{B}_m = \mu_0(\mathbf{H}_m + \mathbf{M}) \quad (IV.1)$$

Donde \mathbf{M} es la imanación de la película delgada y \mathbf{H}_m es obtenido de la ecuación (IV.2), siendo \mathbf{H}_D el campo desimanador en la muestra:

$$\mathbf{H}_m = \mathbf{H} - \mathbf{H}_D \quad (IV.2)$$

El flujo generado en las 4 bobinas detectoras viene dado por la ecuación (IV.3):

$$\phi = \oint \mathbf{B} * d\mathbf{S} \quad (IV.3)$$

Donde \mathbf{B} es el campo magnético generado por la película delgada donde están las bobinas detectoras.

Según la Ley de Faraday-Lenz, ecuación (IV.4), es necesario que exista una variación de flujo magnético para que se induzca una tensión en bornes de las bobinas detectoras:

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad (IV.4)$$

Dado que el campo \mathbf{H} es constante y uniforme, la forma de que exista un flujo variable es mediante las oscilaciones de la muestra, tal y como aparece en la *Figura IV-3*:

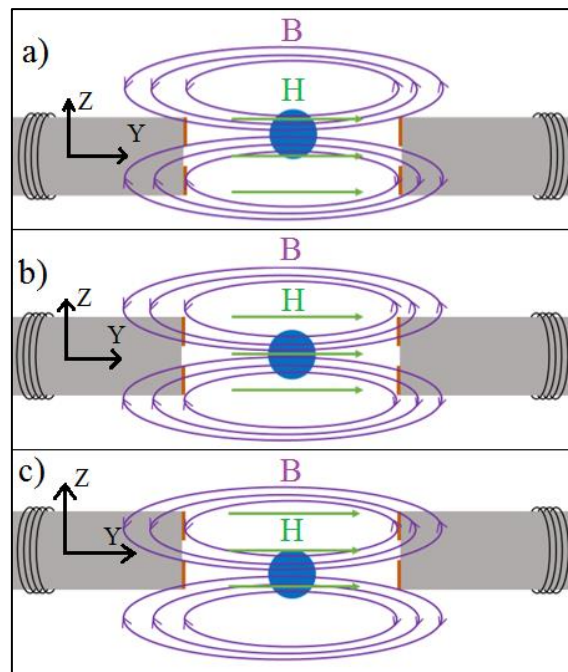


Figura IV-3: Esquema en dos dimensiones de las posiciones por las que oscila la muestra: $z=z_{m\acute{a}x}$ (a), $z=0$ (b) y $z=z_{m\acute{i}n}$ (c). La varilla de fibra de vidrio no aparece representada.

Por lo tanto, para captar únicamente los valores de momento magnético de la muestra, se disponen las bobinas en serie oposición, según la Configuración Mallinson[17]. De esta

manera, a la salida de las bobinas se tiene una tensión equivalente a la variación de flujo provocada por el momento magnético. De esta forma, se logran 2 fines: por un lado, aumentar el flujo captado por la muestra (el doble), y, por otro lado, compensar la contribución al flujo del campo magnético exterior. Esta señal detectada es enviada al amplificador digital.

El sistema está automatizado. Debido a que la fuente DC es monopolar, se necesita utilizar un conmutador, para poder generar corrientes eléctricas en ambos sentidos. Este conmutador ha sido diseñado por investigadores del Laboratorio de Magnetismo.

El vibrador genera un movimiento armónico de 64 Hz de frecuencia y de décimas de milímetro de amplitud. De él cuelga la varilla que sostiene la película delgada en el gap, que tiene el movimiento armónico generado por el vibrador.

Se dispone de un sensor de amplitud para controlar que el movimiento armónico es el correcto; un conjunto de imanes que se mueven junto con la varilla de fibra de vidrio, mientras que un bobinado estático dentro del vibrador detecta dicho movimiento, una vez más, gracias a la Ley de Faraday-Lenz (ecuación IV.4), ya que se induce una tensión en el bobinado. Esta dinámica se representa a continuación, en la *Figura IV-4*.

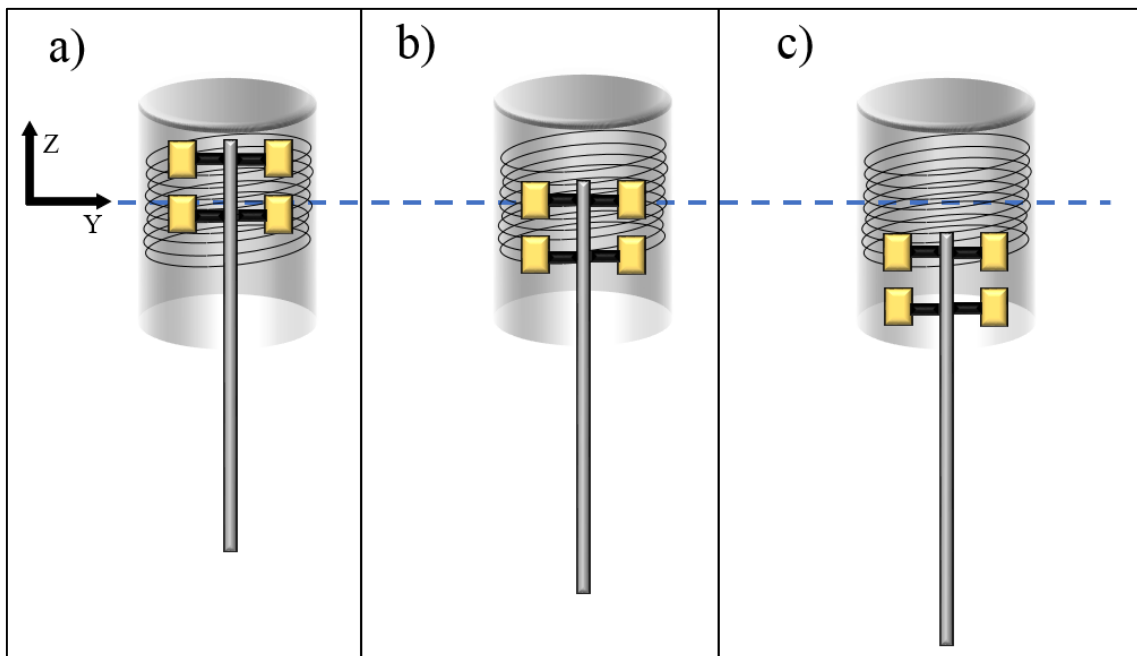


Figura IV-4: Esquema en dos dimensiones del sistema de detección del vibrador, en donde los imanes y la varilla de fibra de vidrio son solidarias en el movimiento armónico, mientras que la bobina detectora permanece estática. En a) $z=z_{máx}$, en b) $z=0$ y en c) $z=z_{mín}$.

Para medir el campo aplicado por el electroimán en el entrehierro, **H**, se utiliza una sonda Hall. Está situada en el entrehierro, lo más cercana posible a la muestra, cuyos valores detectados los recoge un teslámetro, que a su vez envía los datos al PC.

IV.2. MOKE

IV.2.1. Fundamento

El efecto Kerr magnetoóptico (del inglés MOKE), es utilizado para medir una señal proporcional a la imanación de las películas delgadas, y, por consiguiente, medir el ciclo de histéresis. Un haz de luz (onda electromagnética) linealmente polarizado incide en la superficie de la película delgada, y, dependiendo del sentido de su imanación o de la magnitud de su componente transversal, se produce un giro en el plano de polarización del haz de luz reflejada. Un fotodiodo detecta una variación en la intensidad reflejada, la cual es proporcional a la imanación \mathbf{M} de la película delgada.

Se trabaja con una instalación MOKE la cual está formada por dos bloques: el primero, en el que se encuentran los componentes ópticos; y el segundo, en el que se encuentra la parte magnética de la instalación.

IV.2.2. Descripción

El sistema utilizado para este proyecto ha sido diseñado en el Laboratorio de Magnetismo, Departamento de Física, Universidad Pública de Navarra. Tal y como se ha expuesto anteriormente, este sistema está basado en el efecto Kerr transversal: el plano de incidencia del haz de luz es perpendicular a la dirección de imanación de la película delgada, tal y como aparece representado en la *Figura IV-5*:

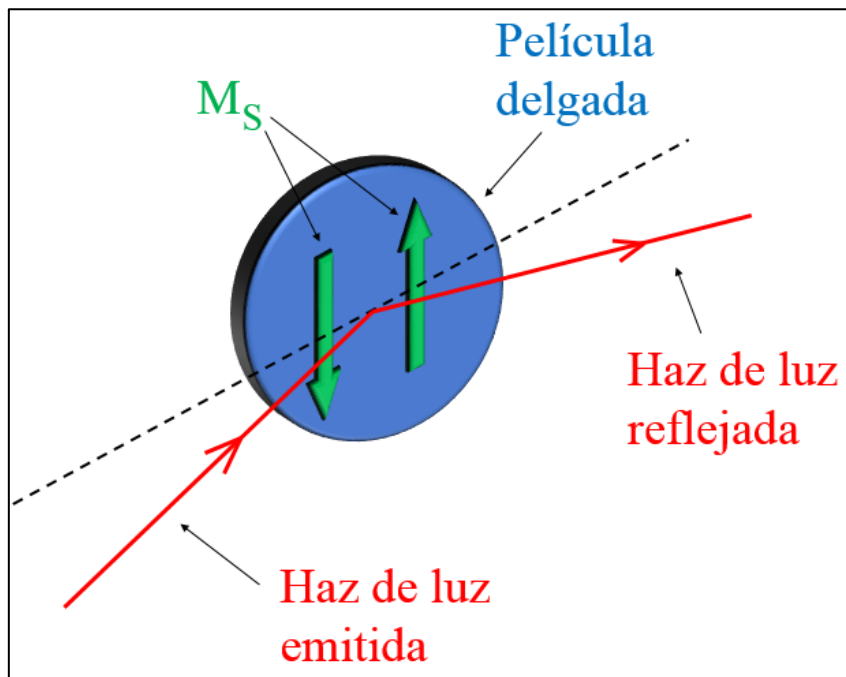


Figura IV-5: Esquema en tres dimensiones de la representación del efecto Kerr transversal.

Gracias a este sistema pueden medirse los ciclos de histéresis de las películas delgadas presentes en este trabajo. Se pueden conocer varios parámetros característicos: la dirección de anisotropía magnética, el valor del campo de anisotropía, e incluso el proceso de imanación (este último, al menos, en su aspecto fenomenológico) [18].

A continuación, en la *Figura IV-6*, se muestra el esquema de la instalación en la que se encuentran los componentes magnéticos:

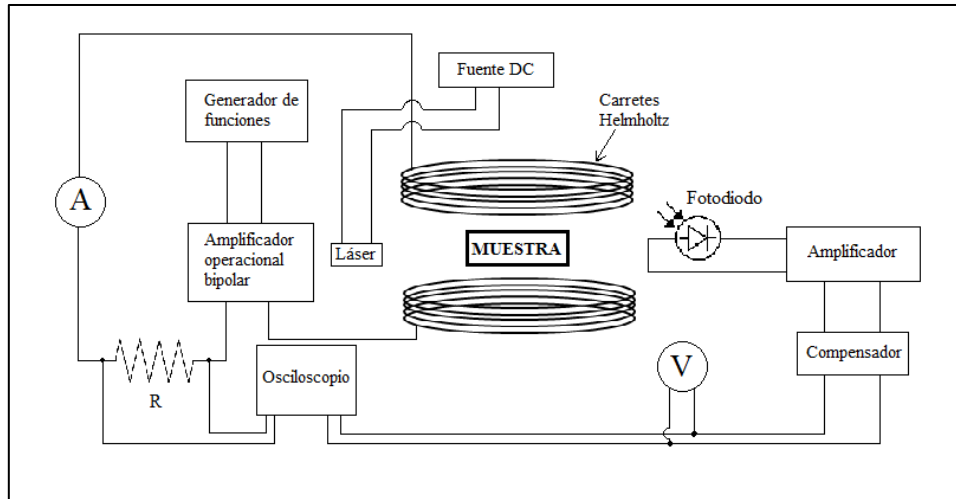


Figura IV-6: Esquema en dos dimensiones del circuito compuesto por los componentes magnéticos de la instalación MOKE (Laboratorio de Magnetismo, Departamento de Física, Universidad Pública de Navarra).

Las bobinas generadoras del campo magnético alterno, aplicado en el plano de la muestra, $\mathbf{H}(t) = H_0 \sin(\omega t)$, con una frecuencia de 78 Hz, son conocidas como *Carretes Helmholtz*, tal y como está indicado en la *Figura IV-6*. Su diseño e implantación corre a cargo del Laboratorio de Magnetismo, del Departamento de Física, de la Universidad Pública de Navarra. La distancia entre los centros geométricos de los dos bobinados, es igual al radio de ambos bobinados; de esta manera, el campo \mathbf{H} es más intenso y uniforme. Los carretes son alimentados por una fuente ac, generando 22 Oe de campo \mathbf{H} por cada amperio de corriente que circula por los carretes. Por lo tanto, la señal equivalente a dicho campo \mathbf{H} , medida en bornes de la resistencia R (*Figura IV-6*), llega al canal de “horizontales” del osciloscopio. Su disposición aparece en la *Figura IV-7*.

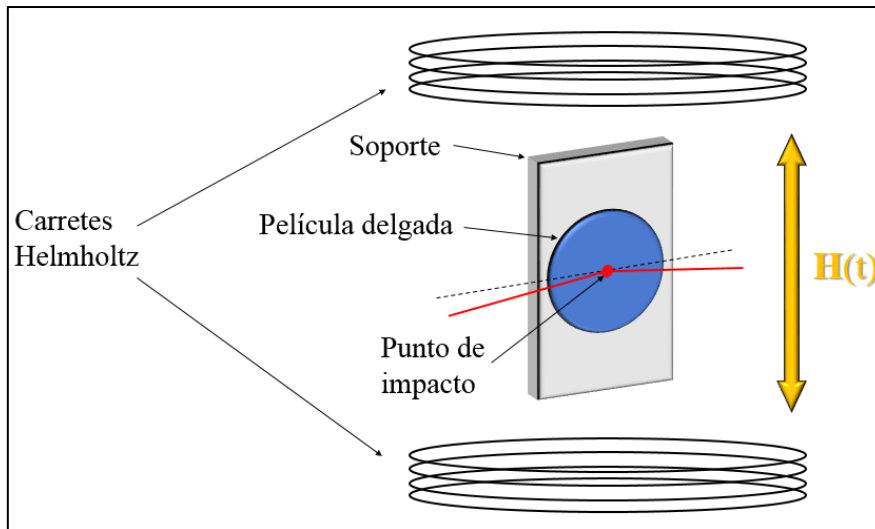


Figura IV-7: Esquema de la zona de impacto del haz láser sobre el plano de la película delgada.

En la *Figura IV-7* también se muestra como la película delgada es sujeta por un soporte rectangular, de forma que la dirección del campo magnético aplicado sea en el plano de la película delgada, y, a su vez, perpendicular al plano de la dirección del haz de láser. Este soporte tiene la peculiaridad que puede girar en el seno del campo magnético; de esta forma, pueden medirse en diferentes direcciones en el plano, estando el campo magnético aplicado en el plano de la muestra.

Por otro lado, el láser fuente de luz es alimentado por una fuente de alimentación dc. En la *Figura IV-9*, se encuentran esquematizados los componentes ópticos del circuito.

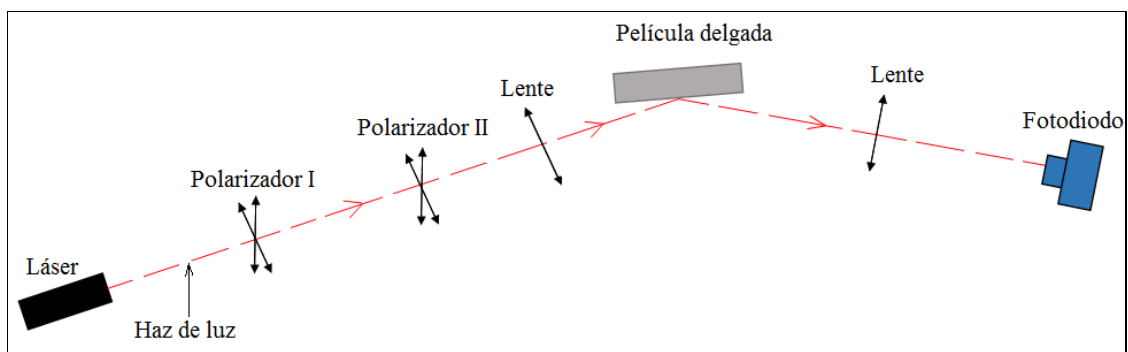


Figura IV-8: Esquema del recorrido del haz de luz láser, desde la emisión del láser hasta la recepción del fotodiodo, incluyendo los componentes ópticos.

Entre la superficie de la película delgada y el láser, se encuentra el *Polarizador I*, el *Polarizador II* y una lente convergente. El primer polarizador controla la intensidad luminosa del haz incidente; para la caracterización de las películas delgadas presentes en este trabajo, se ha ajustado para cada medida este parámetro, teniendo siempre una

intensidad de luz equivalente a 2 V dc. De esta manera, todas las medidas se realizan con respecto a una misma intensidad de luz. El segundo polarizador, sin embargo, controla la dirección del plano de polarización de la luz incidente; la posición de esta lente ha sido la misma para todas las películas delgadas caracterizadas. Esta es de tipo convergente, para focalizar la luz sobre la superficie de la película delgada.

Una vez que la luz se refleja en la película delgada, vuelve a ser focalizada por otra lente, para que sea captada por un fotodiodo. El fotodiodo está conectado a un amplificador, el cual envía las señales a un compensador del Laboratorio de Magnetismo. Gracias a este elemento, se puede trabajar en dc, además de en ac. La ventaja de trabajar en dc es que se logra una señal más pura, ya que elimina el ruido que no interesa al hacer las medidas. La señal proveniente de dicho compensador llega al osciloscopio, a la entrada de “verticales”.

De esta manera, se visualizan en el osciloscopio dos señales de tensión, equivalentes a magnitudes de imanación (eje vertical) y campo magnético (eje horizontal).

IV.3. Medida de la anisotropía o de la isotropía magnética

La dependencia de las propiedades magnéticas según su dirección es la anisotropía magnética. De la misma forma, un material isótropo es aquel que sus propiedades magnéticas no dependen de la dirección en la que se genera el campo magnético.

Más concretamente, en este apartado se habla de la anisotropía magnética de las películas delgadas fabricadas para este trabajo. Su origen reside en la forma tan particular que han sido fabricadas, consiguiendo una anisotropía de forma, debido a la nano-morfología obtenida [14].

Dependiendo en qué dirección del plano de la película delgada sea aplicado el campo magnético \mathbf{H} , esta responde de una manera u otra. Para el caso de las películas delgadas obtenidas mediante PLD en disposición oblicua de este trabajo, la dirección fácil de imanación está contenida en el plano de la película delgada, perpendicular a la dirección de incidencia del plasma [14, 15] tal y como muestra la *Figura IV-9*:

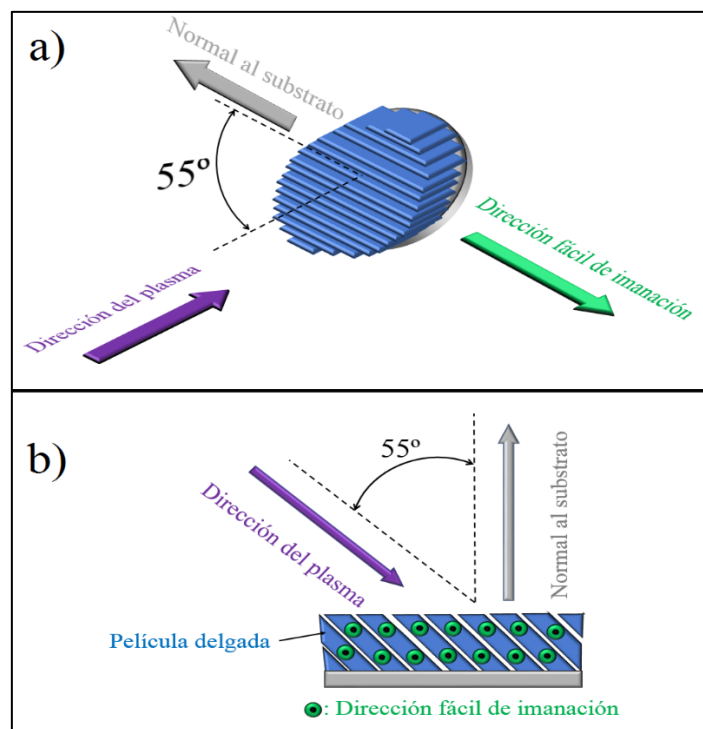


Figura IV-9: Esquema para mostrar la dirección fácil en el plano de las películas delgadas fabricadas con deposición oblicua con respecto a la dirección del plasma. En a) aparece representado en 3 dimensiones, mientras que en b), en 2 dimensiones, en el plano de la dirección del plasma y la normal del substrato. La dirección fácil de imanación de las películas delgadas se encuentra en el plano de la superficie, siendo, a su vez, perpendicular a la dirección del plasma en la deposición. Esta dirección fácil es la misma para todas las películas delgadas fabricadas mediante deposición oblicua de este trabajo.

Es decir, depende de en qué dirección sea aplicado el campo \mathbf{H} , el proceso de imanación del material será distinto. Para este trabajo, resulta de vital importancia analizar la evolución de la imanación de la película delgada, \mathbf{M} , para el caso en el que el campo \mathbf{H} es aplicado en la dirección difícil de imanación, para las películas delgadas fabricadas con incidencia oblicua; se trata de la dirección perpendicular a la fácil.

Para explicar el proceso de imanación de las películas delgadas PLD oblicuas, se sigue el modelo de rotación de Stoner-Wohlfarth [19]. De acuerdo con trabajos previos [14, 15] este comportamiento es al que deben asemejarse las películas delgadas PLD oblicuas obtenidas en este trabajo. A continuación, en la *Figura IV-10*, se muestra un ciclo de histéresis ideal para un proceso de imanación por rotación pura.

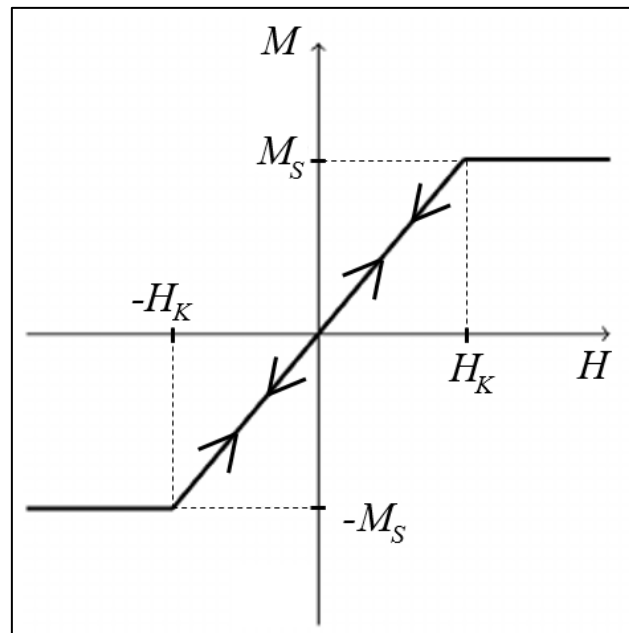


Figura IV-10: Ciclo de histéresis M - H ideal para un proceso de imanación por rotación pura. H es el campo magnético aplicado en el plano de la película delgada en la dirección difícil, mientras que M es la imanación de la película delgada en la dirección del campo aplicado H .

Resulta de vital importancia analizar este tipo de ciclo debido a que sus valores característicos son definitorios para la anisotropía de la película delgada. Fijándose en el ciclo anteriormente mostrado, en la *Figura IV-10*, se tienen 2 zonas o procesos reversibles distintos: la magnitud de \mathbf{M} es directamente proporcional a la de \mathbf{H} (1) y el valor de \mathbf{M} se mantiene constante para los valores de \mathbf{H} de esa zona (2). El valor de \mathbf{H} para el cual se cambia de zona, tal y como se aprecia en el ciclo, es el llamado **campo de anisotropía**, \mathbf{H}_K : se trata del campo necesario para saturar la muestra en la dirección difícil.

- 1) **Proceso lineal:** En el ciclo de histéresis $M-H$ ideal, para $-H_K < H < H_K$, la evolución de M es directamente proporcional a la magnitud del campo aplicado H : $M = H \frac{M_S}{H_K}$, siendo M_S el módulo de la imanación de saturación.
- 2) **Proceso saturado:** Ocurre en los casos en que $|H| > |H_K|$. Aplicando valores de campo mayores que el de anisotropía, la imanación del material no aumenta. Esto es, el material llega a la saturación, siendo $M = M_S$, sea cual sea la magnitud de H .

Para explicar el proceso de rotación de la imanación de la película delgada depositada oblicuamente en la dirección difícil, conviene reducir el fenómeno a monodominios magnéticos, tal y como se muestra en la *Figura IV-11*:

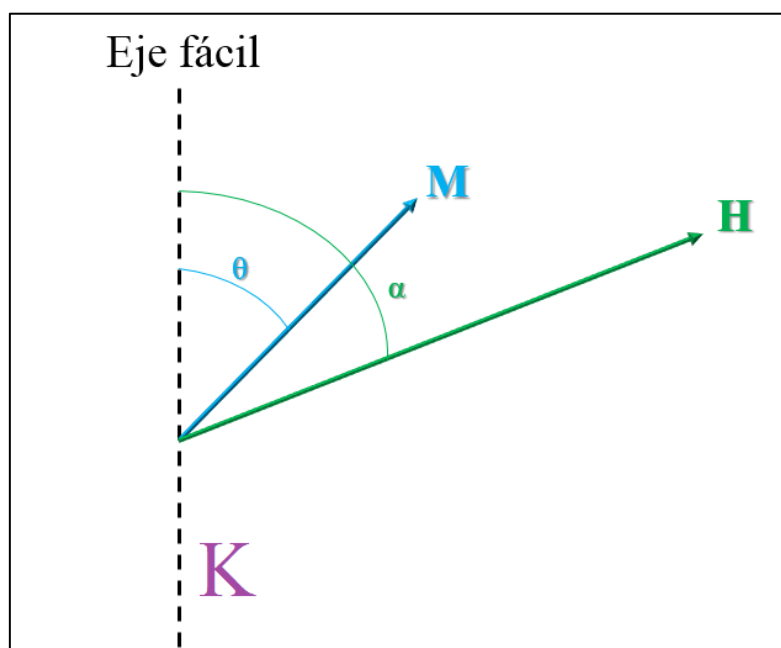


Figura IV-11: Representación gráfica de un monodominio magnético. El campo externo H es aplicado en una dirección distinta a la de fácil imanación (a un ángulo α), mientras que la imanación M está en pleno proceso de rotación, alejándose de la dirección o eje fácil (a un ángulo θ). Se representa con la “K” la constante de anisotropía del monodominio.

Al tener anisotropía uniáxica, la muestra tiene una dirección preferente para imanarse, la llamada dirección fácil. Aplicando un campo externo H , fuera de la dirección fácil de imanación, se produce un proceso de imanación del material por rotación. El momento magnético del monodominio se aleja de la dirección fácil, tendiendo a imanarse hacia la dirección en la que está el campo H , a medida que va aumentando su magnitud [19].

Se va a analizar el caso en el que el campo externo H es aplicado en la dirección difícil, es decir, en la dirección perpendicular a la fácil ($\alpha = 90^\circ$). En la *Figura IV-12* se

encuentran las secuencias de la imanación por rotación para el caso de la imanación en la dirección difícil, para las películas delgadas depositadas oblicuamente.

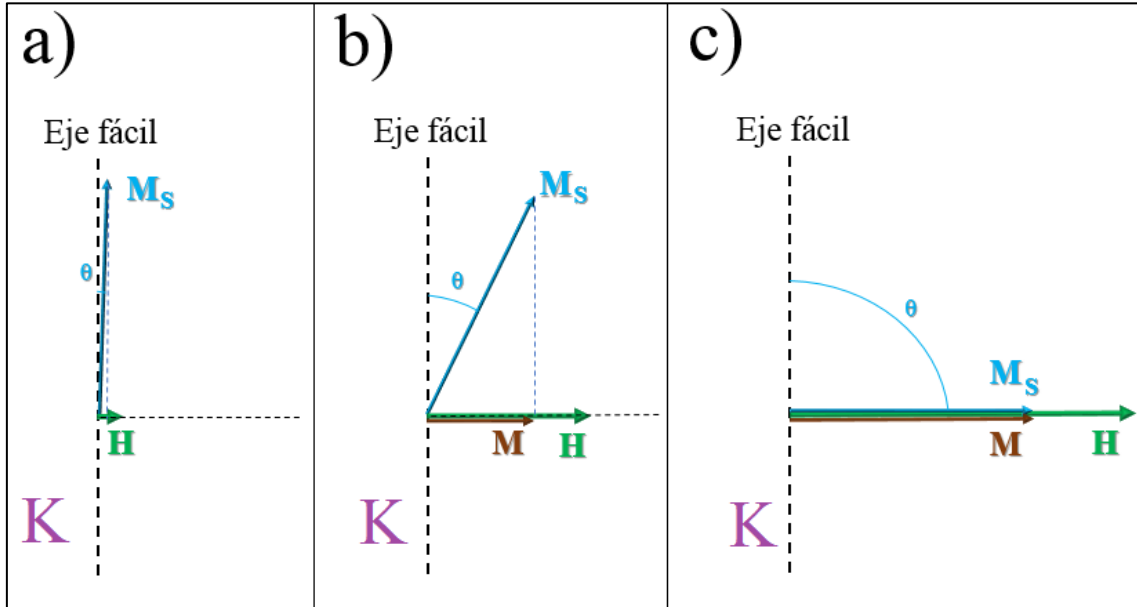


Figura IV-12: Secuencias de la imanación por rotación para el caso particular del campo \mathbf{H} aplicado en la dirección difícil. Es la proyección de la imanación en el eje en el cual está dirigido el campo \mathbf{H} la que se mide en este caso concreto, es decir, M . En a), $H \approx 0$ y la dirección de M_s apenas rota del eje fácil; por lo tanto, su proyección en la dirección de \mathbf{H} es nula. En b), $H < H_K$, por lo que aún no se ha llegado a la saturación, por lo que la rotación está trabajando en la zona lineal, y a medida que crece H , M también lo hace. En c) $H > H_K$, es decir, se llega a la saturación; aunque la magnitud de H aumente, la imanación del material se satura, esta sigue siendo M_s . En cada secuencia, se representa con la letra “ K ” la constante de anisotropía del monodominio.

En este proceso de rotación del momento magnético \mathbf{M}_s , se tienen dos contribuciones energéticas; de la anisotropía (Ecuación IV.1) y del campo magnético (Ecuación IV.2):

$$E_a = K \sin^2(\theta) \quad (IV.5)$$

$$E_m = -\mu_0 \mathbf{M}_s \mathbf{H} \quad (IV.6)$$

Entrando más en detalle en la ecuación (IV.1), aquí se encuentra uno de los parámetros más característicos para el análisis de la anisotropía: la constante de anisotropía K .

Haciendo la suma de las ecuaciones (IV.1) y (IV.2), y viendo la configuración de la Figura IV-11, la energía total E :

$$E = E_a + E_m = K \sin^2(\theta) - \mu_0 M_s H \cos(\alpha - \theta) \quad (IV.7)$$

La componente de la imanación en la dirección del campo aplicado (IV.4):

$$M = M_S \cos (\alpha - \theta) \quad (IV.8)$$

Obteniendo:

$$\text{sen } (\theta) = \frac{M}{M_S} \quad (IV.9)$$

La posición de equilibrio para M_S viene dada por (IV.5):

$$\frac{dE}{d\theta} = 0 \quad (IV.10)$$

Para el caso particular en el que el campo aplicado \mathbf{H} es perpendicular al eje fácil (es decir, \mathbf{H} es paralelo a la dirección difícil), se tiene que $\alpha = \frac{\pi}{2}$. Por lo tanto:

$$E = K \text{sen}^2 (\theta) - \mu_0 M_S H \cos \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \quad (IV.11)$$

Aplicando (IV.5) en (IV.6), se tiene que:

$$\frac{dE}{d\theta} = 2K \text{sen } (\theta) \cos (\theta) - \mu_0 M_S H \text{sen} \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) = 0$$

$$2K \text{sen } (\theta) \cos (\theta) = \mu_0 M_S H \cos (\theta)$$

$$2K \text{sen } (\theta) = \mu_0 M_S H \quad (IV.12)$$

Se obtiene, por lo tanto, de (IV.9) y de (IV.12):

$$\text{sen } (\theta) = \frac{\mu_0 M_S H}{2K} = \frac{M}{M_S} \quad (IV.13)$$

$\text{sen } (\theta)$ es, por lo tanto, proporcional al campo \mathbf{H} , mientras se cumpla que $\text{sen } (\theta) < 1$. En el instante en el que $\text{sen } (\theta) = 1$ (es decir, $M = M_S$), $H = H_K$ y deja de haber rotaciones. A partir de ese momento, ya no hay relación lineal del campo \mathbf{H} con \mathbf{M} , ya que esta se encuentra saturada, llegando a:

$$2K = \mu_0 M_S H_K \quad (IV.14)$$

Finalmente, reordenando (IV.14), se logra el valor de la constante de anisotropía K , tal y como se expone a continuación en (IV.15):

$$K = \frac{\mu_0 M_S H_K}{2} \quad (IV.15)$$

Para este trabajo, de las películas delgadas obtenidas, el campo de anisotropía H_K puede obtenerse de forma experimental, no así la imanación de saturación. Aún así, se tiene una relación proporcional entre la imanación y el momento magnético de una misma muestra. Sabiendo que, para una película delgada de Co puro se tiene $(\mu_0 M_S)_{Co} = 1.4 \text{ T}$ [1, 3, 8], tras medir el momento magnético de saturación de las demás muestras pueden calcularse sus valores de imanación de saturación.

Por lo tanto, de los valores experimentales obtenidos, puede saberse la constante de anisotropía K de cada película delgada. Este parámetro es de vital importancia, ya que es intrínseco al material.

V. Resultados

V.1. Resultados estructurales

Los resultados obtenidos se clasifican en 3 grupos:

- 1) Láminas utilizadas como target de Co y Cu (*Figura V-1*).
- 2) Películas delgadas con deposición oblicua de Co y Cu puros, restándoles el fondo del Si monocristalino (111) (*Figura V-2*).
- 3) Películas delgadas con deposición oblicua de $\text{Co}_{100-x} - \text{Cu}_x$, con $x = 0, 5, 10, 20$ y 30 , con el fondo del Si monocristalino (111) restado (*Figura V-3*).

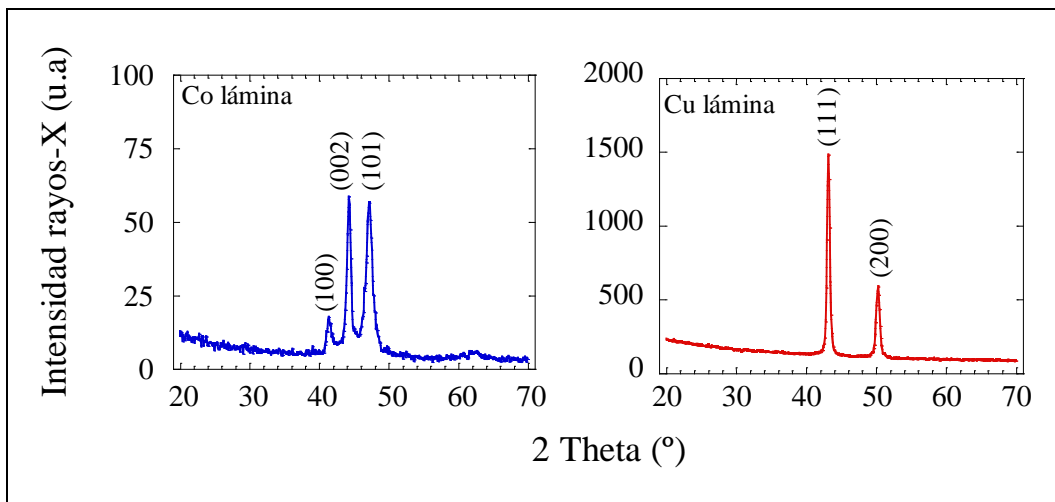


Figura V-1: Espectro de difracción de rayos-X para las láminas utilizadas como target de Co y Cu.

Tal y como se muestra en la *Figura V-1*, los picos que se detectan en las gráficas realizadas para el análisis de las láminas de Co y Cu corresponden a los planos cristalinos de cada lámina, descritos anteriormente en el capítulo referente al estudio de la estructura: para el Co, los planos (100), (002) y (101) se encuentran, respectivamente, en 41.6° , 44.5° y 47.4° . Para el Cu, (111) y (200) en 43.3° y 50.4° .

Para los datos obtenidos de la serie correspondiente a las películas delgadas con deposición oblicua, tanto para los de Co y Cu puros como para los de $\text{Co}_{100-x} - \text{Cu}_x$, se ha restado el fondo que proviene de la señal del Si monocristalino (111). De esta forma, se elimina su contribución en los espectros de rayos-X.

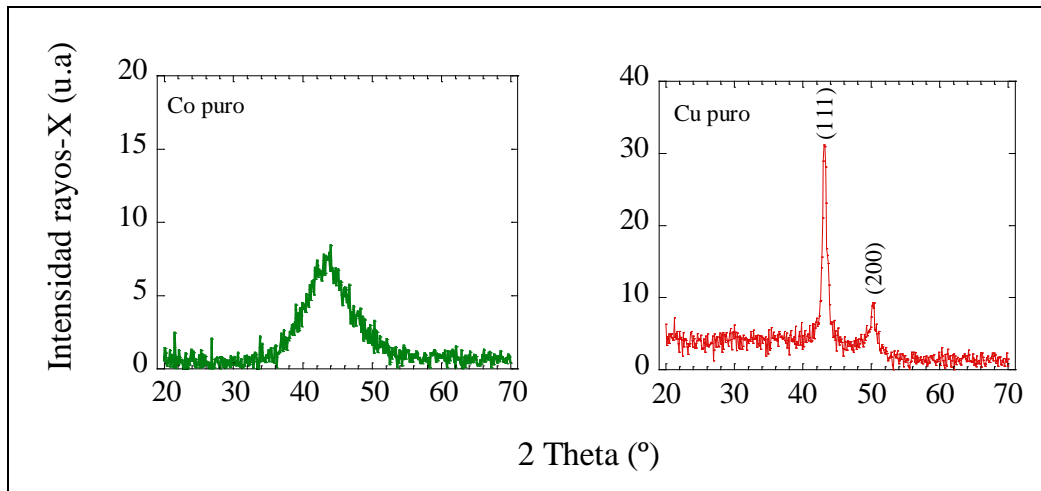


Figura V-2: Espectro de difracción de rayos-X para películas delgadas obtenidas mediante PLD con deposición oblicua, para Co puro y Cu puro, con el fondo del Si monocristalino (111) restado.

La *Figura V-2* muestra cómo después de haber sido depositado oblicuamente, el Co muestra una estructura interna amorfa o nanocristalina (con granos entre 1 y 2 nm) [1, 14] con un halo centrado en $2\text{Theta} \approx 44.1^\circ$. El Cu, sin embargo, mantiene la estructura cristalina que presentaba también la lámina de Cu: los picos aparecen destacados para $2\text{Theta} = 43.2^\circ$ y $2\text{Theta} = 50.1^\circ$.

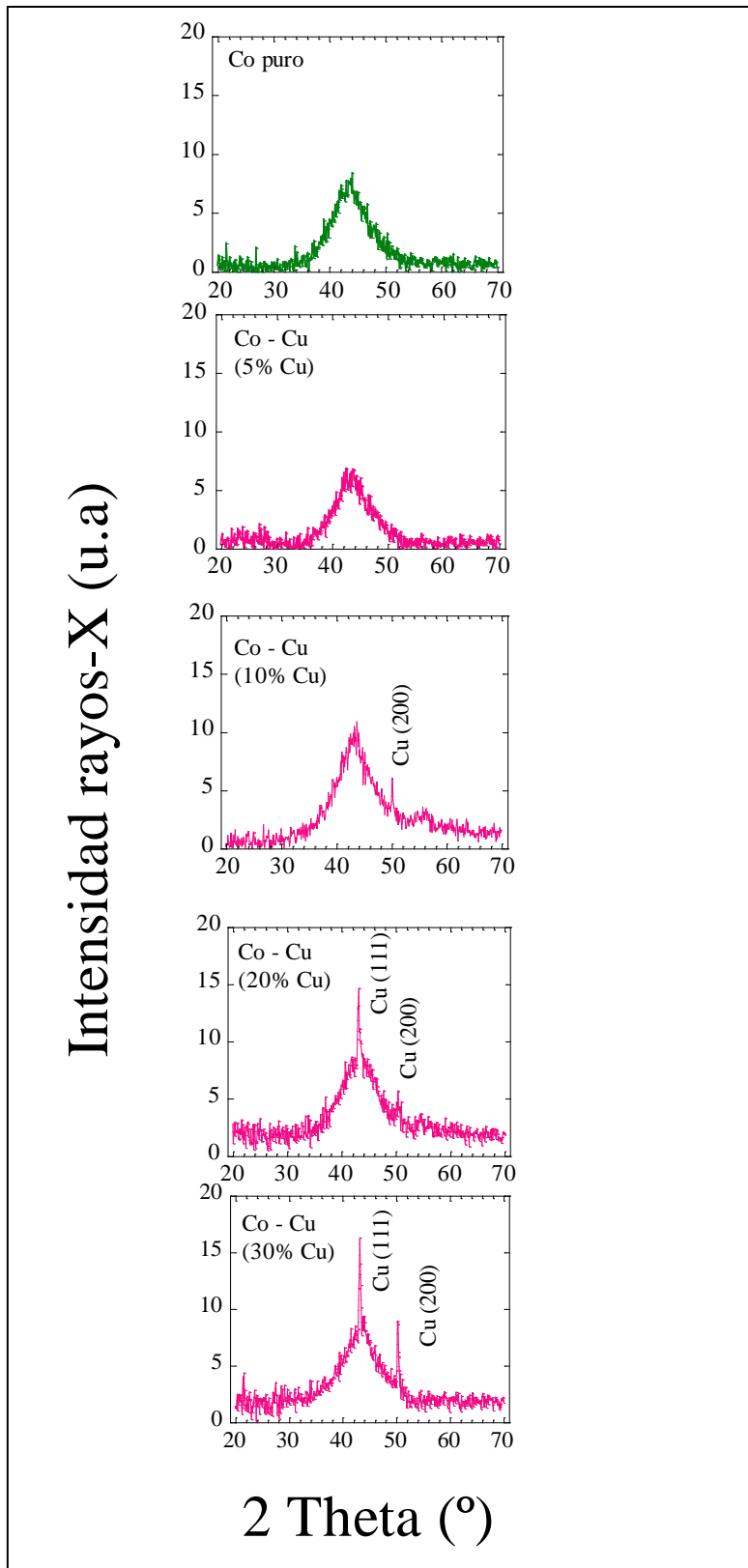


Figura V-3: Espectro de difracción de rayos-X para películas delgadas obtenidas mediante PLD con deposición oblicua, para $Co_{100-x} - Cu_x$, con el fondo del Si monocristalino (111) restado.

Finalmente, en la *Figura V-3* se muestran los resultados obtenidos mediante deposición oblicua de $\text{Co}_{100-x} - \text{Cu}_x$, donde “x” corresponde a la superficie ocupada por el Cu en el target a la hora de hacer el depósito. Se han analizado 5 películas delgadas, con $x = 0$ (Co puro), 5, 10, 20 y 30. En todas ellas, se detecta de una forma clara la estructura amorfa del Co en las películas delgadas.

Las muestras de Co puro y de Co con 5% de Cu muestran una estructura amorfa, con su halo correspondiente centrado en $\approx 43.2^\circ$. No hay rastro de los picos cristalinos del Cu.

En el caso del 10% de Cu en la superficie del target, se observa un caso singular: en la gráfica correspondiente de la *Figura V-3*, se detecta solamente un pico cristalino debido al Cu, para $2\theta \approx 50.3^\circ$, coincidente con el plano (200).

Para el caso en el que se tiene 20% de Cu en la superficie del target, se detectan dos picos de cristalinidad, para $2\theta \approx 43.3^\circ$ y $2\theta \approx 50.4^\circ$. En el último de la serie, para un 30% de Cu en la superficie del target, se acentúan aún más los picos cristalinos que aparecen en $2\theta \approx 43.3^\circ$ y $2\theta \approx 50.4^\circ$, todos ellos pertenecientes a los dos planos cristalinos del Cu. Esto puede atribuirse a un aumento del tamaño del nanocristal.

V.2. Resultados sobre el comportamiento magnético

V.2.1. Comportamiento magnético VSM

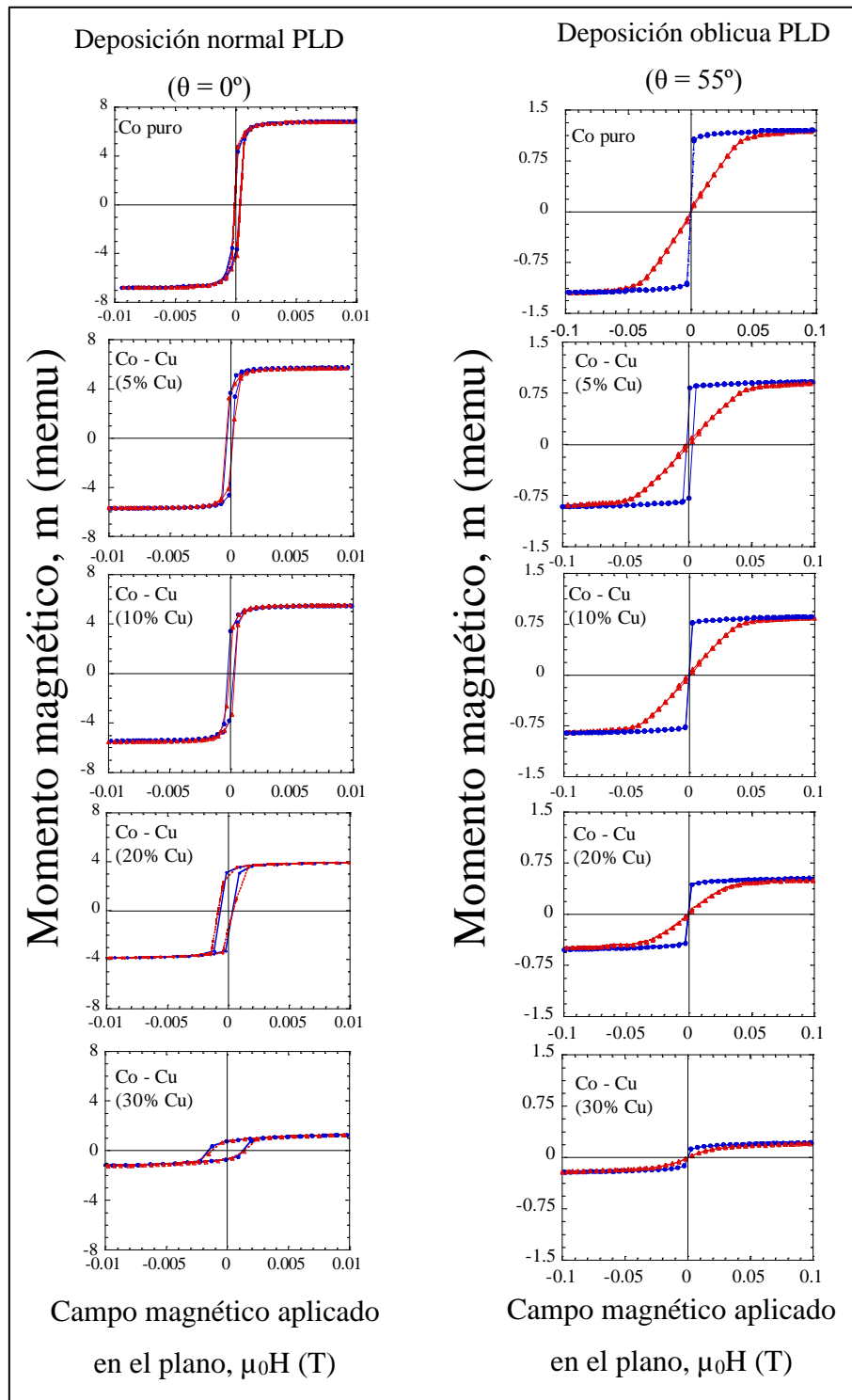


Figura V-4: Medidas de ciclos de histéresis para 2 direcciones perpendiculares del campo magnético aplicado en el plano de las películas delgadas PLD mediante VSM. En la columna de la izquierda se encuentran los ciclos de histéresis medidos para las películas delgadas con deposición normal, habiendo sido medidas en dos direcciones perpendiculares. En la columna de la derecha, los ciclos de histéresis medidos para las películas delgadas con deposición oblicua, siendo los ciclos de color azul los correspondientes a la dirección fácil de imanación, y los de color rojo los correspondientes a la dirección difícil. Nótese la diferencia de la magnitud del campo aplicado.

V.2.1.1. Películas delgadas PLD con deposición normal, $\theta = 0^\circ$.

Tal y como se expone en el pie de la *Figura V-4*, los ciclos correspondientes a la columna izquierda corresponden a las películas delgadas obtenidas mediante deposición normal; estas películas delgadas PLD normales han sido obtenidas en el depósito en el vértice del porta-substratos cónico, tal y como se explicaba en el Capítulo II. Los colores rojo y azul representan los ciclos obtenidos en dos direcciones perpendiculares. A medida que se desciende de gráfico, la concentración de Cu de cada película delgada es mayor. Para un campo máximo aplicado $\mu_0 H = 0.01$ T, todas las muestras se encuentran saturadas, o pueden considerarse saturadas.

Se aprecia un claro comportamiento isotrópico para las películas delgadas obtenidas mediante deposición normal; para cada caso, los ciclos obtenidos en dos direcciones perpendiculares son prácticamente iguales. Es decir, no se detecta una dirección preferente de imanación.

Además, según aumenta la concentración de Cu de las películas delgadas Co-Cu PLD depositadas normalmente:

- 1) El campo coercitivo H_C aumenta.
- 2) El momento magnético máximo m_{max} disminuye.

Para este último punto (la evolución de m_{max} para diferentes concentraciones de Cu), se han medido todas las películas delgadas PLD, tanto normales como oblicuas, para un campo máximo aplicado en el plano de 1 T. Para esa magnitud de campo magnético, sí que se consideran saturadas todas las películas delgadas, por lo que pueden tomarse $m_{max} \approx m_s$. A continuación, en la *Figura V-5*, se observa cómo el momento magnético máximo de cada película decrece de forma lineal a medida que haya más superficie de Cu en el target.

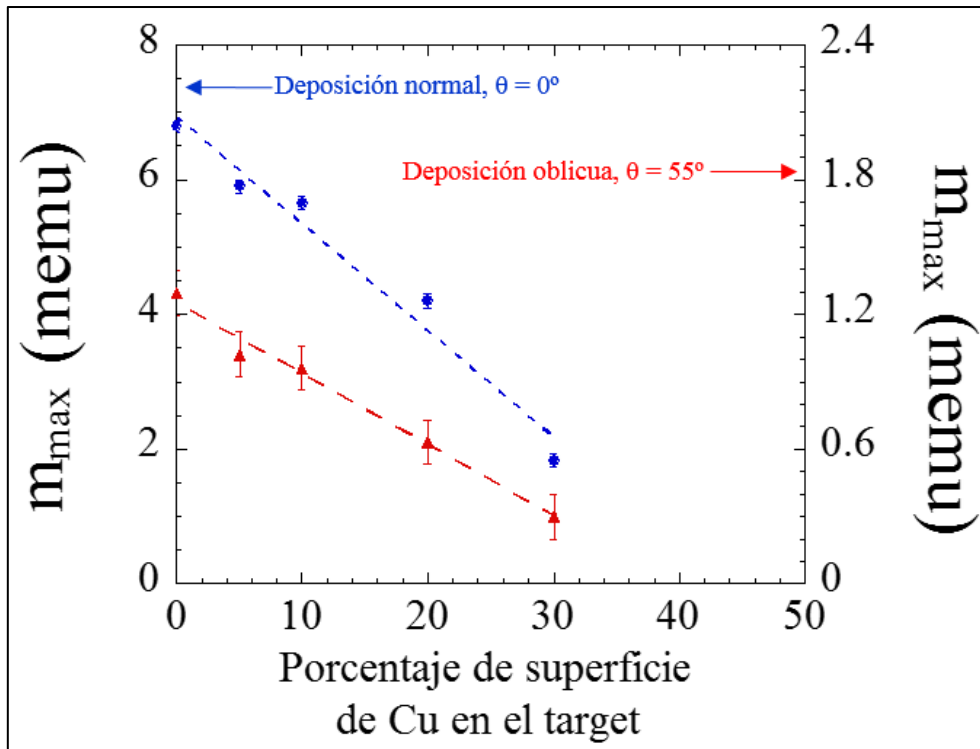


Figura V-5: Comparación de los momentos magnéticos máximos para películas delgadas PLD depositadas normalmente (azul) y oblicuamente (rojo), para un campo magnético aplicado en el plano máximo de 1 T. Se asume una relación lineal entre los valores medidos. Se introducen barras de error para ambos tipos de deposición debido al error de medida (± 0.1 memu).

V.2.1.2. Películas delgadas PLD con deposición oblicua, $\theta = 55^\circ$.

En la columna derecha de la *Figura V-4*, en cambio, se encuentran los ciclos de histéresis obtenidos para películas delgadas PLD con deposición oblicua. En este caso, todos los ciclos de color azul corresponden a la dirección fácil de imanación de las películas delgadas, mientras que los de color rojo lo son para la dirección difícil de imanación.

Para un campo máximo aplicado $\mu_0 H = 0.1$ T (10 veces mayor que para el caso de las películas delgadas depositadas normalmente), se aprecia que, para cada película delgada oblicua, el momento magnético medido en la dirección difícil y la dirección fácil llegan al mismo valor. Su evolución aparece también en la anteriormente comentada *Figura V-5*, siguiendo la misma tendencia: a medida que en la superficie del target hay más Cu, el momento magnético máximo de las películas delgadas decrece de forma lineal; eso sí, únicamente hasta valores de 30% de Cu, ya que, para cantidades mayores de Cu, no han sido fabricadas más películas delgadas PLD. Se introducen barras de error.

Tal y como se adelantaba en estudios previos [14, 15] y apartados anteriores de este trabajo, mediante este tipo de deposición se obtienen películas delgadas con una dirección

preferente de imanación muy marcada. Viendo las gráficas correspondientes a dichas películas delgadas en la *Figura V-4* (columna derecha), se comprueba que así es también para este caso. A continuación, en la *Figura V-6*, se compara un ciclo reversible ideal con el obtenido para la dirección difícil de la película delgada oblicua de Co-Cu, con 10% de Cu en la superficie del target:

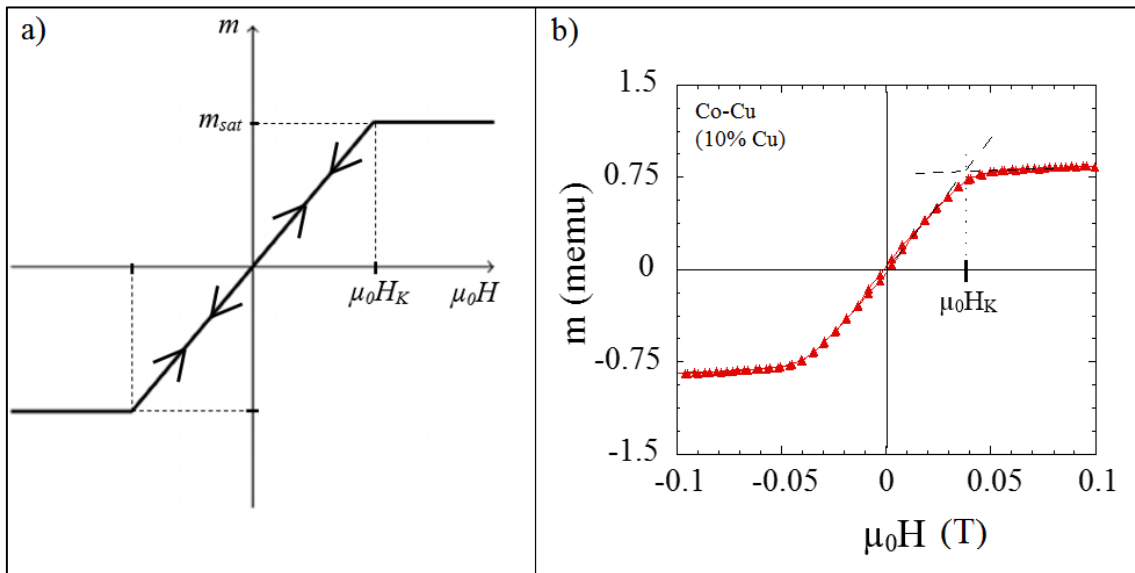


Figura V-6: Comparativa de 2 ciclos de histéresis reversibles. En a) se encuentra uno ideal, mientras que en b) se tiene el ciclo obtenido para la dirección difícil de la película delgada PLD con 10% de Cu en la superficie del target.

En el apartado correspondiente a la medida de la anisotropía, se establecen 2 zonas de comportamiento magnético para un ciclo de histéresis reversible; por un lado, una zona lineal en el que el momento magnético m es directamente proporcional al campo externo aplicado $\mu_0 H$, y, por otro lado, una zona de saturación, en la que el momento magnético m es igual a su valor de saturación, y no crece más. En el ciclo ideal de la *Figura V-6* (el gráfico *a*), se observa con claridad estas 2 zonas, cuyo punto de intersección de las interpolaciones es el equivalente al campo de anisotropía $\mu_0 H_K$. En el ciclo obtenido con la película delgada PLD oblicua Co-Cu, con 10% de Cu en la superficie del target (gráfico *b* de la *Figura V-6*), se observa un comportamiento casi idéntico al ideal: por un lado, se tiene una zona lineal con muy poca histéresis, y al llegar a saturación, hay que hacer una muy pequeña aproximación para determinar el valor de $\mu_0 H_K$. Así pues, se determina que las películas delgadas PLD oblicuas obtenidas por el método expuesto en este trabajo presentan un alto comportamiento anisótropo, que es uno de los objetivos perseguidos.

Continuando con el análisis de la dirección difícil de las películas delgadas PLD oblicuas, un parámetro imprescindible a determinar es la constante de anisotropía K de cada una de estas películas delgadas oblicuas. De la ecuación IV.15 del apartado correspondiente a la medida de la anisotropía, el campo de anisotropía H_K obtenido de forma experimental es necesario para la obtención de la constante de anisotropía K de cada una de las películas delgadas oblicuas. Es por eso que, en la *Figura V-7*, se representan los ciclos correspondientes a las direcciones difíciles de todas las películas delgadas oblicuas.

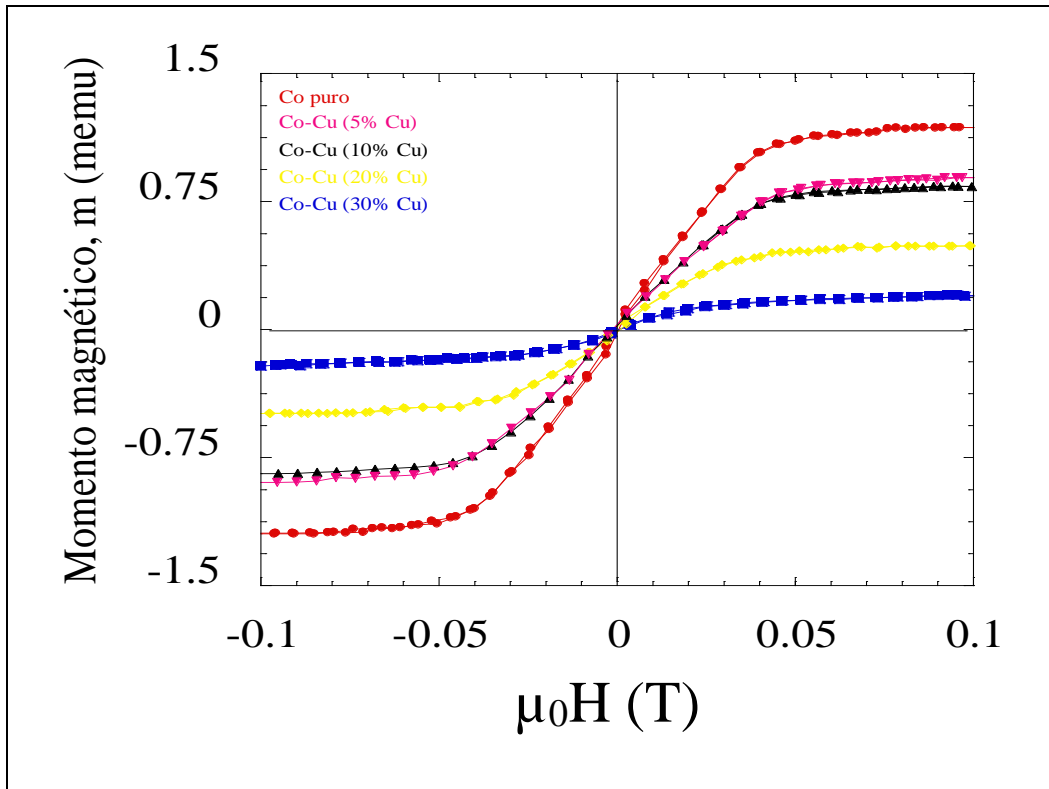


Figura V-7: Ciclos de histéresis para las direcciones difíciles de todas las películas delgadas depositadas oblicuamente ($\theta = 55^\circ$).

Por lo tanto, para cada película delgada se tendrá:

% de Cu	$\mu_0 H_K$ (T)	H_K (A/m)
0	4.7×10^{-2}	3.7×10^4
5	4.6×10^{-2}	3.6×10^4
10	3.9×10^{-2}	3.1×10^4
20	3.6×10^{-2}	2.9×10^4
30	2.6×10^{-2}	2.0×10^4

Tabla V-1: Valores del campo de anisotropía de las películas delgadas PLD oblicuas $Co_{100-x}Cu_x$, siendo “x” la superficie de Cu en el target. Se muestran dos columnas, cada una en diferente unidad; en una, en T, mientras que, en la otra, en A/m.

Tras mostrar los resultados de la *Tabla V-1*, se visualiza gráficamente la evolución de $\mu_0 H_K$ frente al porcentaje de Cu en el target en la *Figura V-8*. El campo de anisotropía descende de forma lineal a medida que crece la proporción de Cu en la película delgada PLD oblicua.

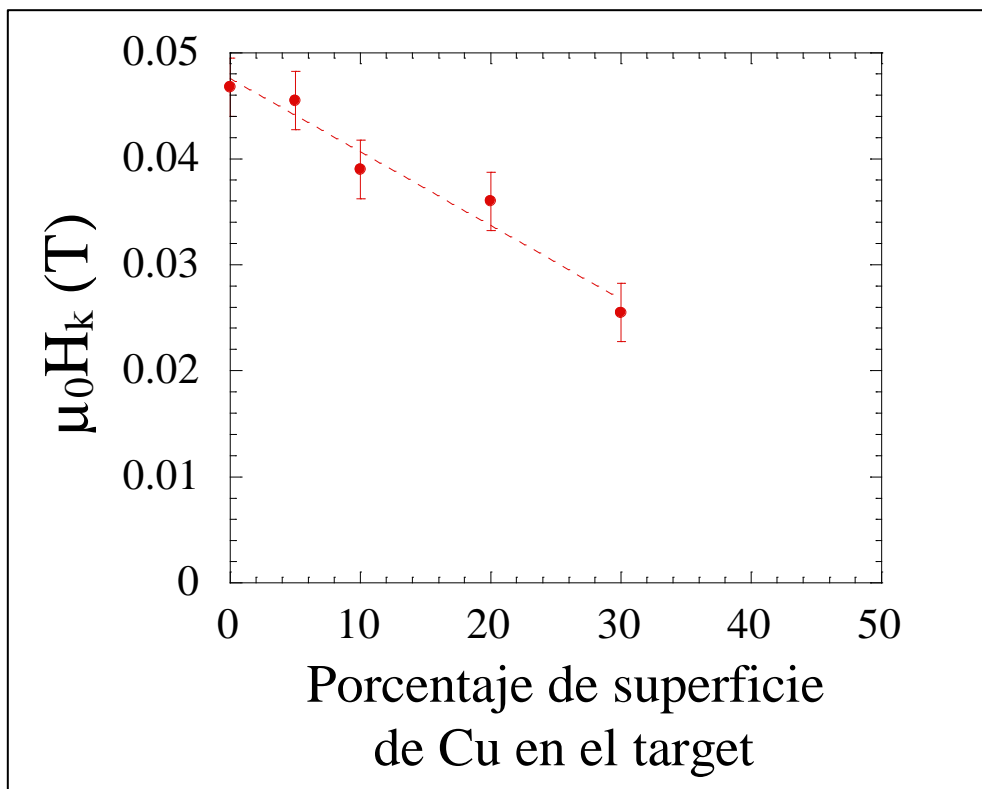


Figura V-8: Valores de $\mu_0 H_K$ de las películas delgadas PLD oblicuas. Se asume, a vista de resultados experimentales, una función lineal. Se añaden a los valores obtenidos barras de error (± 0.003 T).

Sabiendo los campos de anisotropía de cada película delgada y la imanación de saturación, aplicando la ecuación (IV.15) se obtiene la constante de anisotropía de cada una.

Es necesario calcular los valores de $\mu_0 M_S$ a través de los valores del momento magnético de saturación de cada muestra: los 1.3 memu medidos a través de VSM para la película delgada PLD oblicua de Co puro corresponden a 1.4 T de $\mu_0 M_S$ [1, 3, 8], suponiendo la relación lineal dada por (V.1):

$$M_S = \frac{m_S}{V} \quad (V.1)$$

Donde V es el volumen de la película delgada.

% de Cu	$m_{\max} \pm 0.1$ (memu)	$\mu_0 M_S$ (T)
0	1.3	1.4
5	1.0	1.1
10	0.9	0.9
20	0.6	0.6
30	0.3	0.3

Tabla V-2: Valores de $\mu_0 M_S$ de las películas delgadas PLD oblicuas $Co_{100-x}Cu_x$, siendo “x” la porción de superficie de Cu en el target, obtenidos a través de los valores medidos de m_{\max} .

Pudiendo lograr, de esta manera, el valor de la constante de anisotropía K de cada una de las películas delgadas PLD oblicuas (Tabla V-3):

% de Cu	K (J/m³)
0	2.6×10^4
5	2.0×10^4
10	1.4×10^4
20	8.7×10^3
30	3.0×10^3

Tabla V-3: Valores de la constante de anisotropía K de las películas delgadas PLD oblicuas $Co_{100-x}Cu_x$, siendo “x” la porción de superficie de Cu en el target.

De la misma forma que para la evolución de los valores de $\mu_0 H_K$, se realiza una gráfica para mostrar la evolución de la constante de anisotropía K para las diferentes películas delgadas PLD oblicuas (Figura V-9):

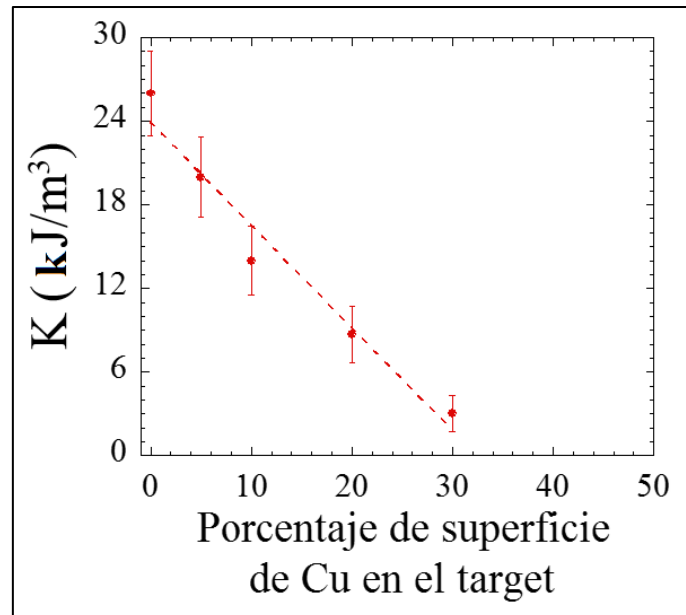


Figura V-9: Valores de la constante de anisotropía K de las diferentes películas delgadas PLD oblicuas. Se supone una función lineal, deducido de los resultados experimentales obtenidos; no se han fabricado más películas delgadas PLD en este trabajo, por lo que resultan desconocidos los valores de K para cantidades mayores del 30% de Cu en el target para compuestos $Co_{100-x}-Cu_x$. Los errores presentes en esta gráfica son debidos a la propagación de errores de magnitudes medidas anteriormente.

Finalmente, pese a que en la *Figura V-5* no se aprecie (debido a la magnitud del campo magnético aplicado, que es de 0.1 T), para la dirección fácil de todas las películas delgadas PLD oblicuas se tiene un ciclo cuadrado. El campo coercitivo de cada una de ellas es pequeño en comparación al campo magnético aplicado, por lo que, es necesario aplicar un campo más pequeño.

Es por eso que, a continuación, en la *Figura V-10*, se muestra el ciclo de histéresis para la película delgada PLD oblicua $Co_{90}-Cu_{10}$ medido a un campo magnético aplicado en la película delgada máximo de 0.01 T. Solo se muestra un ciclo, nada más que para insistir en que el valor del campo coercitivo H_C es bastante menor que el campo de anisotropía de las películas delgadas PLD.

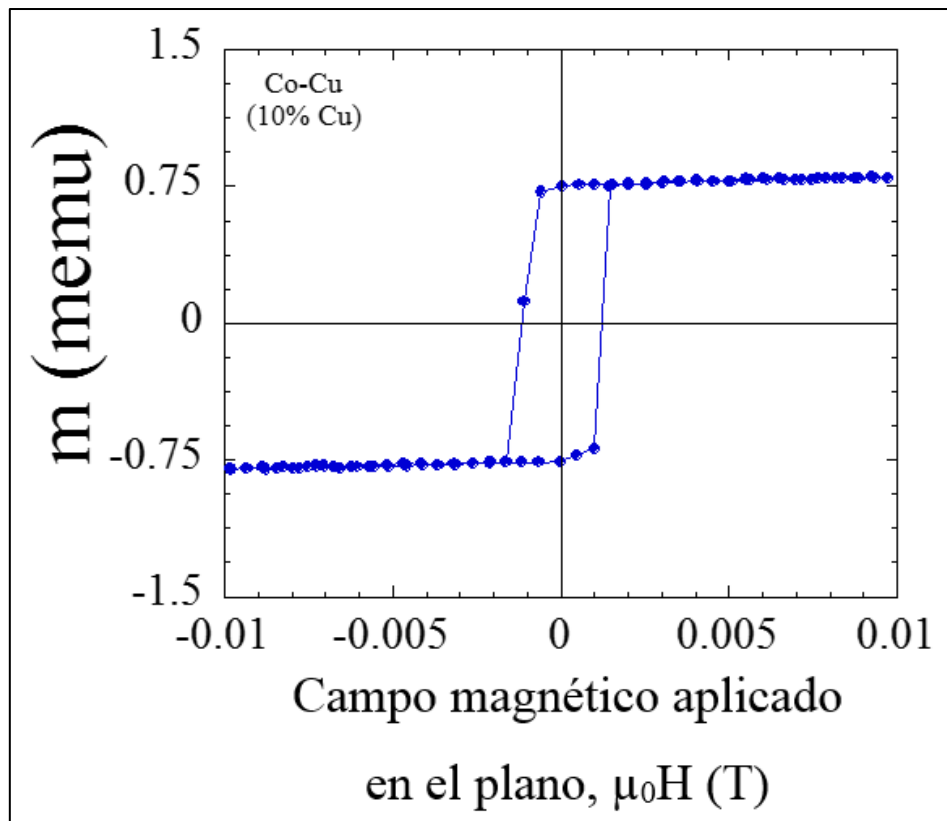


Figura V-10: Ciclo de histéresis medido en VSM con un campo magnético aplicado en el plano de la superficie de la película delgada PLD oblicua $\text{Co}_{90}\text{-Cu}_{10}$. El campo máximo es de 0.01 T, por lo que se ha medido con mayor resolución y puede observarse el valor del campo coercitivo H_c .

V.2.2. Comportamiento magnético MOKE

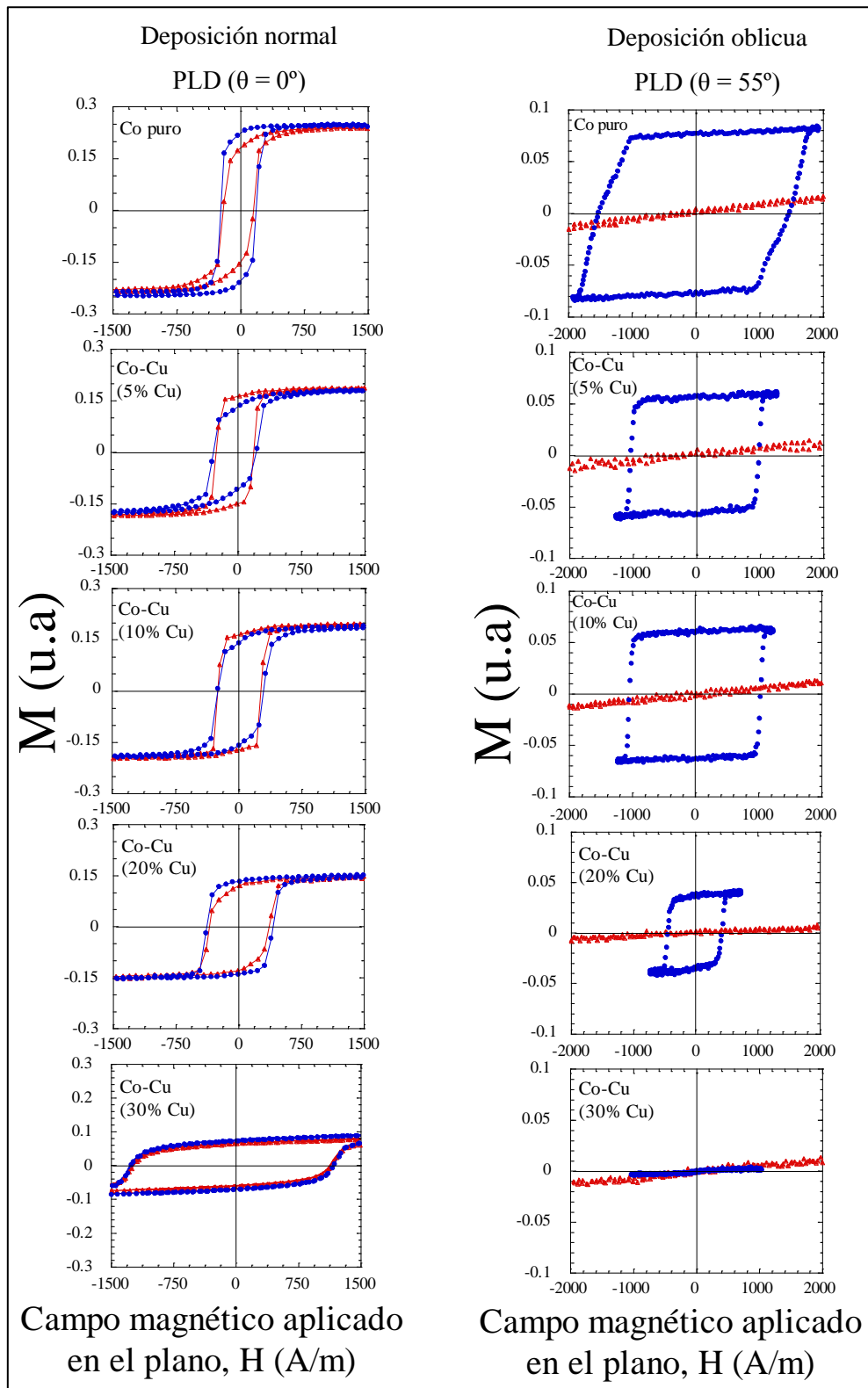


Figura V-11: Ciclos de histéresis medidos en dos direcciones perpendiculares y campo magnético aplicado en el plano para películas delgadas PLD mediante MOKE. En la columna de la izquierda se encuentran los ciclos de histéresis medidos para las películas delgadas con deposición normal, habiendo sido medidas dos direcciones perpendiculares. En la columna de la derecha, los ciclos de histéresis medidos para las películas delgadas con deposición oblicua, siendo los ciclos de color azul los correspondientes a la dirección fácil de imanación, y los de color rojo los correspondientes a la dirección difícil.

Mediante las mediciones realizadas con MOKE, los ciclos de la *Figura V-11*, se corrobora lo expuesto en el apartado de VSM.

Con el equipo utilizado en el Laboratorio de Magnetismo (Departamento de Física, Universidad Pública de Navarra) se ha trabajado con valores de campo de unos 2000 A/m. Es decir, valores muy inferiores a los utilizados con la instalación de VSM (también en el Laboratorio de Magnetismo), por lo que muchas de las muestras no alcanzan la saturación en la dirección difícil; esto se aborda más adelante.

V.2.2.1. Películas delgadas PLD con deposición normal, $\theta = 0^\circ$.

Se representan en la columna izquierda de la *Figura V-11* los ciclos de histéresis correspondientes a las películas delgadas PLD con deposición normal; se representan con colores azul y rojo, a los ciclos medidos en dos direcciones perpendiculares entre sí. Se observa, como cabía esperar, un comportamiento isótropo; para cada película delgada, los ciclos correspondientes a dos direcciones perpendiculares entre sí son casi iguales.

En el caso de las películas delgadas PLD con deposición normal, para un campo magnético en el plano máximo $H_{MAX} = 1500$ A/m, todas las muestras están saturadas. Siguiendo con los campos coercitivos H_C , cabe destacar lo siguiente: a medida que las películas delgadas PLD normales tienen mayor cantidad de Cu, su H_C aumenta.

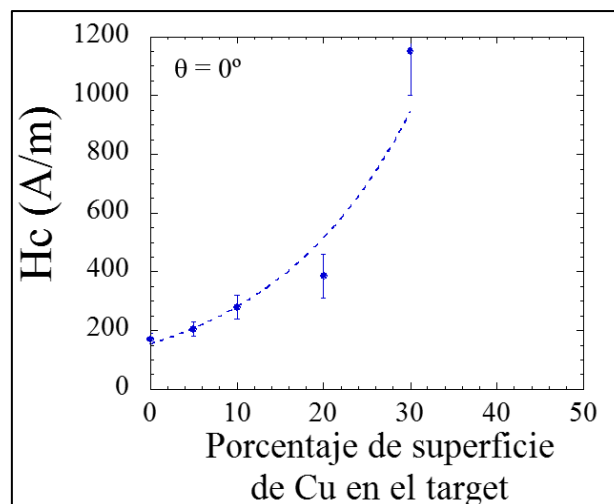


Figura V-12: Valores para el campo coercitivo H_c de las películas delgadas PLD normales $Co_{100-x}Cu_x$, siendo “x” la proporción de Cu en la superficie del target, medidas mediante MOKE. Las barras de error varían según la composición de Cu que haya en las películas delgadas PLD normales; cuanto más Cu hay, más error hay en la medida.

V.2.2.2. Películas delgadas PLD con deposición oblicua, $\theta = 55^\circ$.

Los ciclos de histéresis que se encuentran en la columna derecha de la *Figura V-11* corresponden a las películas delgadas PLD con deposición oblicua, medidas con MOKE. Tal y como se hizo con el VSM, en este caso los colores de cada ciclo coinciden con las direcciones medidas: los azules, para la dirección fácil, y los rojos, para la difícil.

Se aprecia con gran claridad, para los ciclos correspondientes a la dirección difícil de las películas delgadas (*Figura V-11*, columna derecha, color rojo), que no se llega a saturar la muestra. Esto es debido a lo que se ha comentado antes: el campo magnético máximo aplicado en el plano, H_{MAX} , es mucho menor que el campo de anisotropía de la muestra, H_K . Aun así, resulta de gran utilidad esta representación gráfica: una vez más, se comprueba que el comportamiento magnético de las películas delgadas PLD oblicuas es el mismo que el analizado mediante VSM.

Respecto a la evolución de los campos coercitivos H_C de los ciclos de histéresis correspondientes a la dirección fácil de las películas delgadas PLD oblicuas (*Figura V-11*, columna derecha, color azul) destacar que es diferente a la anteriormente estudiada (películas delgadas PLD normales). En este caso, el campo coercitivo H_C decrece a medida que la concentración de Cu es mayor en las películas delgadas PLD oblicuas, tal y como se expone, a continuación, en la *Figura V-13*:

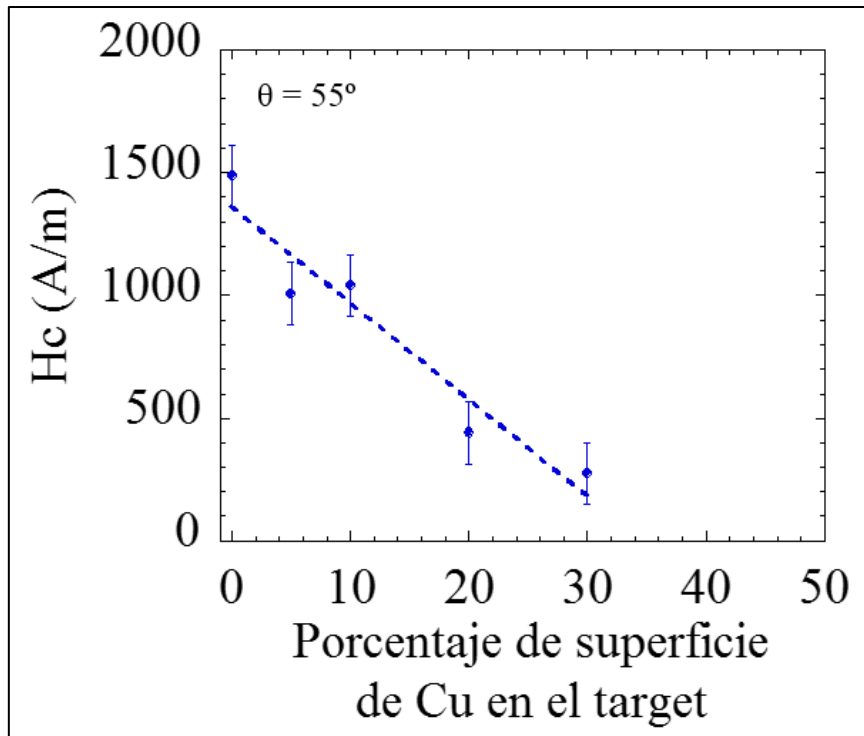


Figura V-13: Valores para el campo coercitivo H_c de las películas delgadas PLD oblicuas $Co_{100-x}Cu_x$, siendo “ x ” la proporción de Cu en la superficie del target. Para cantidades mayor de Cu no se conoce la tendencia de H_c .

Además, los ciclos correspondientes a la dirección fácil de las películas delgadas PLD oblicuas son menos cuadrados a medida que las muestras tienen más Cu (*Figura V-11*). Con esto puede decirse que, cuanto más Cu tiene la película delgada PLD oblicua, hay que aplicar campos magnéticos externos mayores que H_c para saturar la muestra en la dirección fácil.

VI. Conclusiones y líneas futuras

VI.1. Conclusiones

Para la elaboración de este trabajo, se han obtenido películas delgadas PLD, con deposición normal y oblicua, para $\text{Co}_{100-x}\text{-Cu}_x$, con $x = 0, 5, 10, 20$ y 30 . En el caso de las películas delgadas con Cu, se han utilizado sectores de Cu sobre el target de Co; esto, unido a la particular técnica de PLD del Laboratorio de Magnetismo, del Laboratorio de Física de la Universidad Pública de Navarra, para obtener películas delgadas formadas por nanoláminas, hace que sea un trabajo novedoso.

Se han fabricado películas delgadas mediante una técnica particular de PLD. Gracias al porta-substratos diseñado por el profesor Vicente Madurga, se han fabricado simultáneamente películas delgadas PLD con incidencia normal y oblicua. De esta manera, su composición es idéntica y las condiciones de deposición no se alteran.

Para el estudio estructural de las películas delgadas PLD oblicuas, se parten de láminas de Co y Cu, las cuales muestran sus picos cristalinos característicos (hcp para el Co y fcc para el Cu). Al hacer depósitos oblicuos PLD de Co puro y Cu puro, se obtienen películas delgadas de Co amorfas y películas delgadas de Cu cristalinas (mantiene sus picos cristalinos originales). A la hora de hacer depósitos de películas delgadas PLD oblicuas, se resalta lo siguiente: para los compuestos de $\text{Co}_{100-x}\text{-Cu}_x$ con cantidades pequeñas de Cu, la estructura de la película delgada es amorfa. Sin embargo, a medida que las películas delgadas PLD oblicuas tienen cantidades mayores de Cu, los picos cristalinos de Cu se acentúan cada vez más. Puede ser debido a un aumento del tamaño del nanocrystal del Cu en las matrices amorfas del Co.

Lo más destacable es haber originado, mediante deposición PLD oblicua, anisotropía magnética uniaxial para los compuestos $\text{Co}_{100-x}\text{-Cu}_x$. Todas las películas delgadas PLD oblicuas muestran un claro comportamiento anisótropo uniaxial en el plano de la superficie de la película delgada, siendo la dirección de fácil imanación perpendicular a la dirección del plasma a la hora de ser fabricada la película delgada oblicua mediante PLD.

Gracias a los equipos de VSM y MOKE del Laboratorio de Magnetismo, del Departamento de Física de la Universidad Pública de Navarra, se han podido caracterizar magnéticamente las películas delgadas PLD fabricadas en este trabajo, tanto las normales como las oblicuas. Se han logrado los parámetros característicos de todas las muestras

oblicuas, destacando la medida del campo de anisotropía H_K de todas las películas delgadas PLD en la dirección difícil de imanación, calculando posteriormente la constante de anisotropía K de cada una de las películas delgadas PLD oblicuas. Aplicando un campo magnético externo en la dirección de fácil imanación, todas las películas delgadas alcanzan la imanación de saturación rápidamente.

Para concluir, destaca la importancia que tiene que con ambos sistemas de medida magnética se hayan logrado mismos resultados. De esta manera, los datos obtenidos con uno de los sistemas son corroborados por el otro.

VI.2. Líneas futuras

A la vista de los resultados experimentales, resultaría de gran interés fabricar más compuestos de $\text{Co}_{100-x}\text{-Cu}_x$, con cantidades mayores de Cu. De esta forma, podría analizarse la respuesta magnética de las películas delgadas PLD, en especial la de las películas delgadas PLD oblicuas: ver qué tendencia tendrían sus respectivos imanación máxima m_{max} y su campo de anisotropía H_K .

El estudio del comportamiento del campo coercitivo H_C también resulta atractivo. Se tiene una evolución distinta de H_C según si la deposición ha sido normal u oblicua.

Finalmente, sería muy apropiado realizar tratamientos térmicos en las películas PLD obtenidas [14], para poder estudiar dos aspectos fundamentales:

- 1) Ver si se mantiene o no la nanomorfología de las películas delgadas PLD después de tratarlas térmicamente.
- 2) Aplicaciones magnéticas: la evolución de la anisotropía magnética en función de la temperatura.

VII. Bibliografía

- [1] C. Favieres and V. Madurga, “Determination of the thickness of pulsed laser deposited cylindrical Co films by their magnetoelastic effects,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 96, no. 4, pp. 1850–1856, 2004.
- [2] C. Favieres, J. Vergara, and V. Madurga, “Charged magnetic domain walls as observed in nanostructured thin films: dependence on both film thickness and anisotropy,” *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 25, no. 6, p. 66002, 2013.
- [3] J. Vergara, C. Favieres, and V. Madurga, “Increased ultra high frequency magnetic susceptibility in nanopatterned nanolayers with strong exchange coupling,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 48, no. 435003, p. 6pp, 2015.
- [4] V. Madurga, J. Vergara, and C. Favieres, “Broad UHF ferromagnetic resonance of iron rich-aluminum pulsed laser deposited thin films,” *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 354, no. 47–51, pp. 5198–5200, 2008.
- [5] V. Madurga, J. Vergara, and C. Favieres, “Generating and measuring the anisotropic elastic behaviour of Co thin films with oriented surface nano-strings on micro-cantilevers,” *Nanoscale Res Lett*, vol. 6, no. 1, p. 325, 2011.
- [6] V. Madurga, R. J. Ortega, J. Vergara, S. Palacios, E. Azcoiti, and K. V Rao, “Controlled anisotropic GMR in laser ablated Cu-Co thin films,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 177, pp. 945–946, 1998.
- [7] V. Madurga, C. Favieres, and J. Vergara, “Growth and sculpting of Co nano-strings on Si micro-cantilevers: magneto-mechanical properties,” *Nanotechnology*, vol. 21, no. 9, p. 95702, 2010.
- [8] C. Favieres, J. Vergara, and V. Madurga, “Interface effects on magnetostriction in pulsed laser deposited Co/Fe/Co cylindrical soft magnetic multilayers,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 40, no. 14, pp. 4101–4108, 2007.
- [9] J. F. Ready, “Development of plume of material vaporized by giant-pulse laser,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 3, no. 1, pp. 11–13, 1963.
- [10] R. M. White, “Generation of Elastic Waves by Transient Surface Heating,” *J. Appl. Phys.*, vol. 34, p. 3559, 1963.

- [11] G. A. Askar'yan, A. M. Pokhorov, G. F. Chantutiya, and G. P. Shipulo, "Excitation and dissociation of molecules in an intense light field," *Sov. Phys. JETP*, vol. 17, p. 6, 1963.
- [12] R. G. Meyerand and A. F. Haught, "Gas Breakdown at Optical Frequencies," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 11, p. 403, 1963.
- [13] B. D. Cullity and C. D. Graham, *Introduction to Magnetic Materials (2nd Edition)*, vol. 12, no. 3. 2009.
- [14] C. Favieres, J. Vergara, C. Magén, M. R. Ibarra, and V. Madurga, "Building oriented nano-sheets in thin films of Co-MT (MT = V, Cr, Cu, Zn, Cd, Hf) and the generation and enhancement of their magnetic anisotropy," *J. Alloys Compd.*, vol. 664, pp. 695–706, 2016.
- [15] V. Madurga, J. Vergara, and C. Favieres, "Magnetic domain structures and nano-string morphology of laser off-normal deposited amorphous cobalt films with controlled magnetic anisotropy," in *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2004, vol. 272–276, no. III, pp. 1681–1683.
- [16] D. William and J. Callister, "Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales," *Reverté.*, p. 804, 1995.
- [17] J. Mallinson, "Magnetometer coils and reciprocity," *J. Appl. Phys.*, vol. 37, no. 6, pp. 2514–2515, 1966.
- [18] V. Madurga, C. Favieres, and J. Vergara, *Práctica 7: Ciclo de histéresis: MOKE*. Laboratorio de Magnetismo. Univ. Pública de Navarra.
- [19] E. C. Stoner and E. P. Wohlfarth, "A mechanism of magnetic hysteresis in heterogeneous alloys," *Phil. Trans. Roy. Soc.*, vol. A240, p. 599, 1948.