



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

ZIENTZIA  
ETA TEKNOLOGIA  
FAKULTATEA  
FACULTAD  
DE CIENCIA  
Y TECNOLOGÍA



Gradu Amaierako Lana / Trabajo Fin de Grado  
Ingenieritza Elektronikoko Gradua / Grado en Ingeniería Electrónica

# Fabricación de Microdispositivos de Magneto- Impedancia por Fotolitografía

Egilea/Autora:  
Nerea Lete Segura  
Zuzendaria/Director:  
Alfredo García Arribas  
Zuzendariordea/Subdirectora:  
M<sup>a</sup> Victoria Martínez González





# Índice general

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>5</b>
1.1	Magneto-impedancia . . . . .	5
1.2	MI en películas delgadas . . . . .	8
1.3	Sensores de MI bobinados . . . . .	9
1.4	Objetivos . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Experimental</b>	<b>13</b>
2.1	<i>Sputtering</i> . . . . .	14
2.2	Fotolitografía . . . . .	18
2.2.1	Limpieza previa . . . . .	19
2.2.2	Deposición de la fotorresina . . . . .	20
2.2.3	Exposición . . . . .	20
2.2.4	Revelado . . . . .	22
2.2.5	Deposición por <i>sputtering</i> . . . . .	23
2.2.6	<i>Lift-off</i> . . . . .	23
2.3	Medidas de resistencia . . . . .	24
2.3.1	Medidas de resistencia de los materiales aislantes . . . . .	24
2.3.2	Medidas de resistencia en los dispositivos . . . . .	25
2.4	Medidas de MI . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Resultados</b>	<b>29</b>
3.1	Fabricación de los dispositivos . . . . .	29
3.2	Medidas de resistencia . . . . .	30
3.2.1	Medidas de resistencia de los materiales aislantes . . . . .	30
3.2.1.1	Pruebas de aislamiento de óxido de silicio . . . . .	30
3.2.1.2	Pruebas de aislamiento de germanio . . . . .	32
3.2.2	Medidas de resistencia de los dispositivos . . . . .	34
3.3	Caracterización de la magneto-impedancia . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Conclusiones y futuros estudios</b>	<b>39</b>



# 1 Introducción

Los sensores magnéticos juegan un papel esencial en la tecnología moderna. Se utilizan ampliamente en prácticamente todos los sectores de ingeniería e industria tales como grabación magnética de alta densidad, navegación y seguridad militar, detección y seguimiento, sistemas antirrobo, ensayos no destructivos, marcado y etiquetado magnético, medidas geomagnéticas, investigación espacial, mediciones de campo magnético a bordo de naves espaciales y medidas biomagnéticas en el cuerpo humano [1].

Existe un amplio rango de sensores magnéticos: sensores inductivos, sensores *fluxgate*, sensores de efecto Hall, sensores magneto-ópticos, sensores de magneto-resistencia gigante (GMR), dispositivos de interferencia cuántica gradiométricos (SQUID) y magnetómetros de resonancia, entre otros. La irrupción del fenómeno de magneto-impedancia alrededor de la década de los 90 supuso una nueva alternativa en el campo de los sensores magnéticos [2]. Está demostrado que los sensores basados en el efecto de magneto-impedancia gigante (GMI) presentan determinadas ventajas sobre los sensores magnéticos convencionales. La característica más destacable de los sensores de magneto-impedancia es su sensibilidad. Mientras que un sensor de GMR tiene una sensibilidad frente a campos magnéticos externos del 1%/Oe, un sensor de GMI puede alcanzar sensibilidades de 500%/Oe [1].

## 1.1. Magneto-impedancia

La magneto-impedancia (MI) es el cambio de la impedancia que sufre un conductor ferromagnético blando ante los cambios de un campo magnético externo. La base de la magneto-impedancia es el efecto pelicular, que consiste en la variación de la profundidad de penetración del campo magnético en un material conductor [3]. Cuando una corriente alterna de frecuencia angular  $\omega$  fluye a través de un material conductor se producen corrientes inducidas en la dirección de la corriente original. La superposición de dichas corrientes produce el efecto pelicular o *skin effect*, y la solución de las ecuaciones de Maxwell aplicadas a este caso establece que la distribución de la densidad de corriente se describe por la ecuación [4]

$$J_x = J_0 e^{-x/\delta} e^{-jx/\delta} \quad (1.1)$$

donde  $x$  es la distancia medida desde la superficie del conductor, perpendicular a la corriente. Según la ecuación 1.1 la densidad de corriente decrece de manera exponencial desde la superficie del conductor en función del parámetro  $\delta$  (profundidad de penetración), cuya expresión es

## 1 Introducción

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}}, \quad (1.2)$$

siendo  $\sigma$  la conductividad del material y  $\mu$  la permeabilidad magnética. Para un material magnético con una conductividad dada, cuanto mayor es la permeabilidad o la frecuencia de la corriente, menor es la profundidad de penetración. De esta manera se concentra la corriente en la superficie de la muestra, disminuyendo la sección efectiva por la que pasa. De manera cualitativa esto implica el aumento de la impedancia, que es inversamente proporcional al área en la que fluye la corriente.

La MI se basa en los cambios de permeabilidad magnética producidos por un campo magnético externo. En muestras planas puede analizarse de forma cualitativa el efecto de la aplicación de un campo magnético externo en la permeabilidad para los casos con anisotropía transversal y con anisotropía longitudinal.

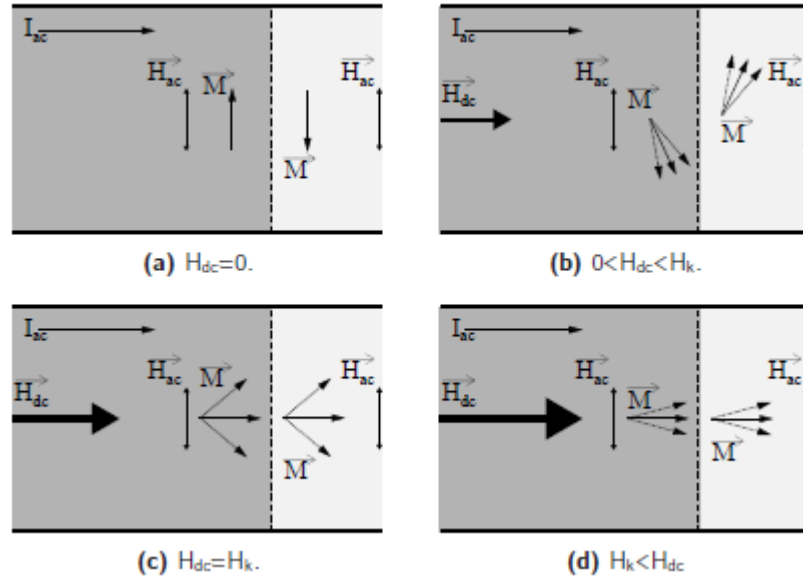


Figura 1.1: Explicación esquemática de la imanación de una muestra con anisotropía transversal a medida que va aumentando el campo magnético longitudinal externo ( $\vec{H}_{dc}$ ) [5].

Supongamos que a una muestra plana de anisotropía transversal con constante de anisotropía  $K$  se le hace fluir a lo largo de ella (en la dirección longitudinal) una corriente alterna  $I_{ac}$ . Esta corriente crea un campo magnético  $\vec{H}_{ac}$  en la dirección transversal. En ausencia de campo magnético externo (Fig. 1.1.a) la imanación  $\vec{M}$  viene fijada por el campo de anisotropía  $\vec{H}_K$ , que viene dado por la expresión [6]

$$H_K = \frac{2K}{\mu_0 M_S} \quad (1.3)$$

donde  $M_S$  es la magnetización de saturación y  $\mu_0$  la permeabilidad del vacío. Dado que  $\vec{H}_{ac}$  y  $\vec{M}$  son paralelos, las variaciones temporales de  $\vec{H}_{ac}$  no provocan cambios apreciables en la imanación y, por tanto, la permeabilidad transversal ( $\mu_t$ ) es baja.

Cuando se aplica un pequeño campo magnético  $\vec{H}_{dc}$  en la dirección longitudinal ( $\vec{H}_{dc} < \vec{H}_K$ ) la posición de equilibrio de  $\vec{M}$  se desplaza un cierto ángulo, cuya magnitud es determinada por la intensidad de  $\vec{H}_{dc}$  y  $\vec{H}_K$ . El campo  $\vec{H}_{ac}$  hace que  $\vec{M}$  oscile alrededor de la posición de equilibrio, aumentando el valor de  $\mu_t$ . Cuanto mayor es el componente transversal de  $\vec{M}$  que oscila, mayor es la permeabilidad. Por tanto,  $\mu_t$  aumenta con el campo  $\vec{H}_{dc}$  aplicado.

Cuando la intensidad del campo aplicado  $\vec{H}_{dc}$  es igual en magnitud que  $\vec{H}_K$  la anisotropía se compensa y  $\vec{M}$  rota libremente siguiendo a  $\vec{H}_{ac}$ . En esta situación la permeabilidad transversal alcanza su máximo valor.

Por último, cuando la magnitud de  $\vec{H}_{dc}$  es mayor que  $\vec{H}_K$  la posición de equilibrio de  $\vec{M}$  se mantiene en posición horizontal. Cuanto mayor es  $\vec{H}_{dc}$ , menor es  $\mu_t$ , dado que la imanación está más fuertemente fijada. Por tanto, la permeabilidad transversal decrece al aumentar  $\vec{H}_{dc}$ , tendiendo asintóticamente a  $\mu_0$ .

En una muestra de anisotropía longitudinal, en cambio, la situación en caso de campo magnético externo nulo es similar a la descrita en la Figura 1.1.c. Al aumentar  $H_{dc}$  se va fijando  $\vec{M}$  en la dirección longitudinal, disminuyendo la permeabilidad transversal. En consecuencia, la curva de magneto-impedancia muestra un único pico centrado en  $H = 0$ . En general, las muestras con anisotropía transversal muestran mayores cambios de impedancia y mejor sensibilidad [6] (Figura 1.2).

El perfil característico de MI de una muestra con anisotropía transversal muestra dos picos simétricos situados en el campo de anisotropía ( $H_{dc} = \pm H_K$ ). El mínimo valor teórico de  $Z$  es la resistencia de la muestra  $R_{dc}$ , que se alcanza en la saturación magnética (grandes valores de  $H_{dc}$ ), cuando  $\mu = \mu_0$ .

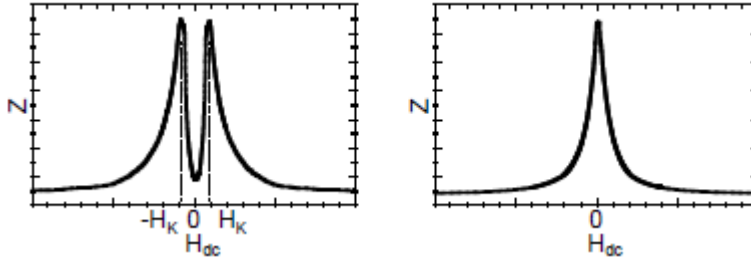


Figura 1.2: Curvas típicas de impedancia en función del campo magnético, aplicado en la dirección del flujo de corriente, para dos diferentes direcciones de anisotropía magnética: transversal (izq.) y longitudinal (dcha.) [5].

La magneto-impedancia se cuantifica habitualmente como una variación en tanto por ciento y para cada valor del campo se define de la forma:

$$MI(\%) = \frac{Z(H) - Z(H_{sat})}{Z(H_{sat})} \times 100\% \quad (1.4)$$

## 1 Introducción

donde  $Z = R + jX$  es la impedancia ( $R$  es la parte real o resistiva y  $X$  es la parte imaginaria o reactancia),  $H$  es el campo externo y  $H_{sat}$  es el campo de saturación magnética de la muestra. Este parámetro es una figura de mérito de la muestra y generalmente se da su valor máximo, que se obtiene cerca del valor del campo de anisotropía  $H_K$ . Otra figura de mérito es la sensibilidad, que es máxima para los valores de campo entre cero y  $H_K$ . Cuanto menor sea  $H_K$ , mayor será la sensibilidad. Por esta razón es conveniente situar el punto de operación de un sensor basado en una muestra de MI con anisotropía transversal en el centro del intervalo de campo limitado por cero y  $H_K$ .

### 1.2. MI en películas delgadas

En el campo de investigación de la magneto-impedancia hay tres grandes grupos de muestras: hilos, cintas y películas delgadas.

Los hilos presentan dificultades para integrarlos en el proceso de fabricación automatizada de un sensor, a pesar de lo cual han sido objeto de muchos trabajos en el ámbito de GMI, dado que los resultados que se obtienen a bajas frecuencias muestran grandes variaciones de impedancia con el campo magnético. Al igual que los hilos, las cintas presentan dificultades a la hora de ser integradas y además tienen peores prestaciones. Las películas delgadas, sin embargo, son integrables en procesos automatizados de fabricación industrial, por lo que son el tipo de muestra más prometedora [7].

Hay varias configuraciones de películas delgadas para magneto-impedancia. Las películas delgadas de una capa, llamadas monocapa, no presentan un comportamiento adecuado a bajas frecuencias, ya que al reducir el espesor disminuye la sensibilidad. La manera de obtener mejores resultados es mediante estructuras de más de una capa, formadas por películas alternadas de un material ferromagnético (F) y un conductor no-magnético (C). Esta configuración aumenta el efecto magneto-inductivo y permite obtener elevados ratios de MI y sensibilidad a frecuencias moderadas (del orden de los MHz). Hay diferentes versiones de esta estructura: *sandwich* cerrado, *sandwich* abierto, multicapa y multicapa *sandwich*. En la Figura 1.3 se muestran las diferentes configuraciones de películas delgadas multicapa para MI.

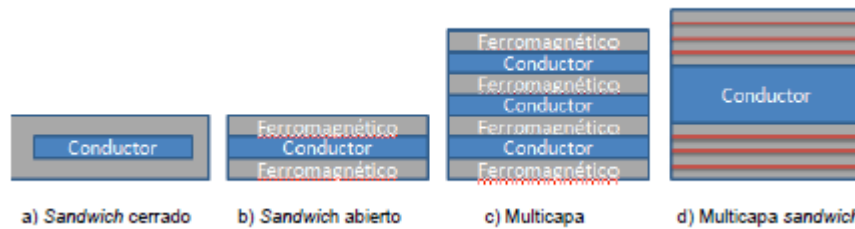


Figura 1.3: Diferentes configuraciones de película delgada multicapa para MI.

En la estructura *sandwich* cerrado el material conductor está totalmente rodeado de material magnético, esto es, las capas magnéticas de arriba y abajo están conectadas. Esto



permite que el flujo magnético que genera la corriente alterna fluya en la muestra y siga un camino cerrado a través de un material altamente permeable. En la estructura *sandwich* abierto, por el contrario, el flujo magnético debe cerrarse a través de un material de baja permeabilidad (aire o el conductor central). La configuración multicapa consiste en la repetición de la estructura F/C/F. Finalmente, la estructura multicapa *sandwich* está formada por una capa conductora central rodeada por dos capas externas de estructura multicapa [8]. En la capa interior se utilizan materiales de alta conductividad, ya que la MI aumenta con la relación de conductividad entre el material ferromagnético y el conductor. Los materiales más comunes son el oro, el cobre y la plata [9]. A modo de material magnético normalmente se emplean materiales de alta permeabilidad, tales como el Permalloy ( $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ ) [10] o aleaciones amorfas de FeCoSiB [11]. El *sputtering* es la técnica más extendida para depositar este tipo de capas delgadas.

### 1.3. Sensores de MI bobinados

En la bibliografía se puede encontrar un gran número de sensores basados en la magneto-impedancia, desde sensores de diseño sencillo [12] formados por una muestra MI y contactos, hasta sensores más elaborados configurados por hilos de MI bobinados [13] o películas delgadas de MI rodeadas por una microbobina [14, 15].

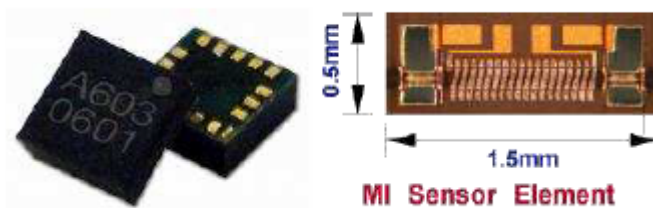


Figura 1.4: Sensor integrado AMI603 de Aichi Micro Intelligent Corp. y su elemento sensor de MI.

El único dispositivo basado en el efecto de MI que ha sido producido a nivel industrial es el sensor integrado AMI603 y los modelos previos de la familia (Figura 1.4), desarrollado por la compañía japonesa Aichi Micro Intelligent Corporation [16]. Este dispositivo funciona como una brújula electrónica capaz de detectar la orientación del campo magnético de la Tierra, pero es a su vez un acelerómetro de tres ejes que usa sensores de MI para medir el campo magnético creado por pequeños imanes colocados en micro-voladizos.

En el AMI603 el elemento sensor es un micro-hilo amorfo de unos  $2\ \mu\text{m}$  de diámetro y  $1.5\ \text{mm}$  de largo. El principio de medida no está directamente relacionado con los cambios de impedancia sino con el voltaje inducido en una bobina que rodea la muestra. Este efecto es conocido como *off-diagonal magneto-impedance*. La mayor desventaja de este dispositivo es que el proceso de fabricación implica la inserción del micro-hilo, que no se

puede fabricar usando métodos estándares de la industria microelectrónica, en el circuito electrónico.

## 1.4. Objetivos

El objetivo de este proyecto es diseñar sensores de campo magnético basados en películas delgadas de Permalloy rodeadas de una microbobina utilizando los métodos actuales de fabricación de la industria microelectrónica.

La bobina que se incluye en el diseño se planteó originalmente con la intención de obtener un comportamiento lineal cerca del punto cero del campo [7], mediante el fenómeno de la *off-diagonal magneto-impedance*. Esta configuración permite obtener salidas lineales en la región de campo magnético nulo sin necesidad de polarizar el material, calculando la relación entre la diferencia de tensión entre los extremos de la bobina y la corriente que se hace pasar por la muestra [15, 17]. Sin embargo, pueden concebirse otros modos de operación utilizando la bobina.

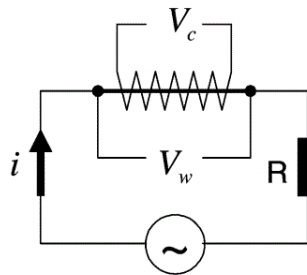


Figura 1.5: Respuesta de tensión debido a la excitación de corriente alterna y campo magnético, medida en la bobina y a través de la muestra.

Refiriéndonos a la Figura 1.5, la impedancia *off-diagonal* se entiende como el ratio  $Z_c = V_c/i$ , mientras que la magneto-impedancia tradicional se refiere a  $Z_w = V_w/i$ . En la Figura 1.6 se muestran las típicas respuestas de tensión para la MI clásica y la MI fuera de la diagonal.

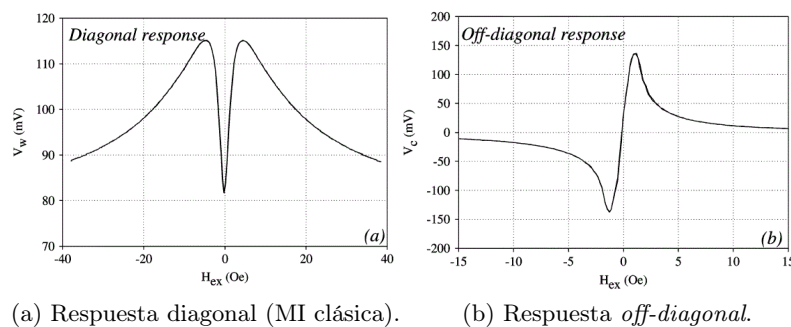


Figura 1.6: Respuestas de tensión obtenidas en una cinta amorfa bobinada [17].

Otro modo de operación consiste en hacer una realimentación de campo para compensar el efecto del campo que se desea medir. Así, la magnitud de la corriente que se hace circular por la bobina para compensar el campo externo (manteniendo constante la impedancia de la muestra) proporciona la salida del sensor. Este modo de operación también aportaría el beneficio típico de la realimentación: incremento de la estabilidad y linealidad del sistema.

La última opción consiste en producir, mediante la bobina, el campo de polarización adecuado para llevar el material al punto óptimo de operación, haciendo circular por dicha bobina la corriente continua adecuada.

El diseño de este tipo de sensores requiere un elevado control de la técnica de fotolitografía, ya que es necesario realizar múltiples procesos consecutivos y si en cada paso no se obtiene un patronado de suficiente calidad, los defectos se propagan e intensifican de una etapa a otra, produciendo un resultado final inaceptable. Para dar la forma deseada al sensor se realizan patronados empleando máscaras con distintas geometrías. En cada una de las etapas, una vez conseguido el patronado deseado mediante las máscaras, se deposita el material correspondiente a cada caso mediante *sputtering* para después, mediante el proceso de *lift-off*, eliminar la parte no deseada del depósito, situada sobre la resina que no se ha disuelto en el proceso de fotolitografía. En total el proceso consta de cinco etapas.



## 2 Experimental

Los dispositivos que se han fabricado en este trabajo están formados por una microbobina planar que rodea una muestra de MI. Para ello se han utilizado técnicas de fabricación de la industria microelectrónica, como son la fotolitografía y la deposición por *sputtering*. Esto permite fabricar de manera paralela 98 dispositivos en una sola oblea. Todas las muestras tienen las mismas dimensiones (100  $\mu\text{m}$  de anchura y 2000  $\mu\text{m}$  de longitud). Las microbobinas tienen diferentes configuraciones, con diferentes anchuras de pista (10, 20, 30 y 40  $\mu\text{m}$ ) y diferente número de vueltas (68, 48, 37 y 32, respectivamente).

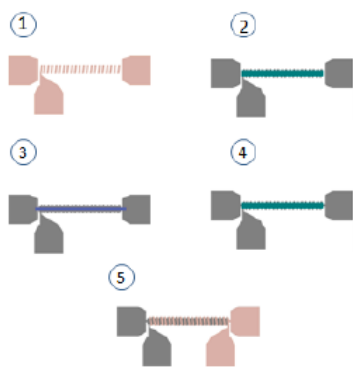


Figura 2.1: Diseño de las microbobinas y etapas del proceso de fabricación.

En la Figura 2.1 se muestran las etapas de fabricación. Para fabricar los dispositivos se han utilizado varios materiales: para la bobina y los contactos (primera y última etapa) se ha depositado Cr, Cu y Au; entre la muestra y los hilos de la bobina se ha depositado  $\text{SiO}_2$  o Ge a modo de aislante, en la segunda y cuarta etapa; en la etapa número tres se ha depositado la muestra de MI. La deposición de las muestras se ha realizado en obleas de Si dopado y con una capa superficial de óxido de silicio. Las características de las obleas utilizadas se resumen en el Cuadro 2.1.

Diámetro	2"
Tipo de dopante	P/Boro
Resistividad	1-10 $\Omega\cdot\text{cm}$
Orientación cristalográfica	$\langle 100 \rangle$
Espesor	$280 \pm 25\mu\text{m}$
Capa de $\text{SiO}_2$	400 nm

Cuadro 2.1: Características de las obleas de silicio.

## 2 Experimental

En los apartados siguientes se describe el proceso de fabricación, los equipos y las técnicas de caracterización que se han empleado en este trabajo.

### 2.1. Sputtering

La técnica de deposición por *sputtering* es muy utilizada para la deposición de capas delgadas, incluso en el ámbito industrial. Es un proceso relativamente simple que permite la deposición uniforme de casi cualquier material, sobre grandes áreas y con un buen control de la estequiometría en el caso de aleaciones y compuestos.

Esta técnica consiste en bombardear un blanco del material a depositar con iones de gas inerte altamente energéticos, generalmente  $\text{Ar}^+$ . Como resultado de la transferencia de energía entre los iones incidentes de  $\text{Ar}^+$  y la superficie del blanco, parte de los átomos de éste salen despedidos. Estos átomos viajan a través de la cámara de deposición hasta llegar al sustrato colocado enfrente del blanco, de manera que, bajo las condiciones adecuadas, se forma una película delgada.

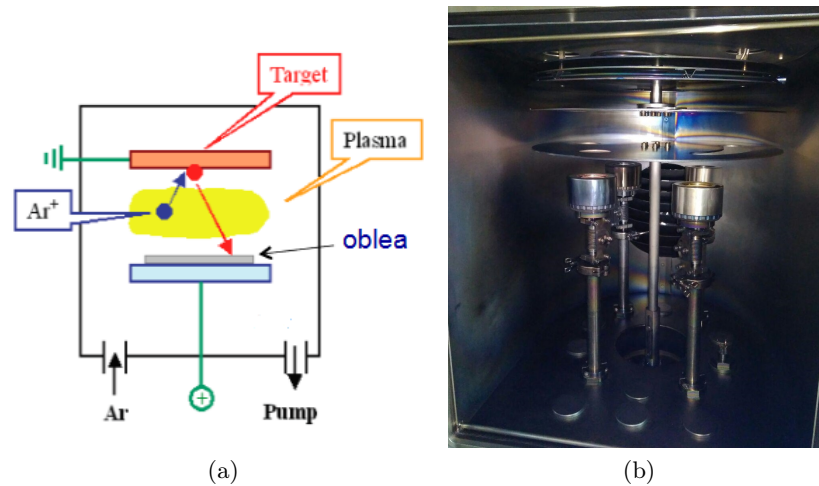


Figura 2.2: Diagrama del proceso de *sputtering* (a) y cámara de deposición (b).

Los iones de  $\text{Ar}^+$  provienen de un plasma que se genera por la gran diferencia de tensión entre el ánodo y el blanco, que funciona de cátodo. El plasma es automantenido ya que el bombardeo, además de producir la pulverización del blanco, emite electrones secundarios que son acelerados hacia el plasma, donde consiguen formar nuevos iones mediante el proceso de ionización en cascada por el impacto con los átomos del gas. La Figura 2.2.a muestra un esquema del proceso de *sputtering*.

El equipo utilizado para la deposición de capas delgadas en este trabajo es un sistema comercial Pfeiffer Vacuum Classic 500. La presión base que puede ser alcanzada en la cámara es de  $5.7 \times 10^{-7}$  mbar mediante una bomba de vacío turbo-molecular. El sistema cuenta con cuatro magnetrones separados que pueden albergar cuatro blancos distintos, permitiendo la deposición de varios materiales sin abrir la cámara (Figura 2.2.b). La

altura de los magnetrones puede ser fijada para estar a una distancia del sustrato de entre 8 y 25 cm. Además, el equipo consta de dos fuentes DC y dos RF para generar el plasma, que pueden ser conectadas a cualquiera de los cuatro magnetrones dependiendo del proceso a realizar. La potencia máxima es de 1000 W para DC y 300 W para RF. El flujo de Ar en la cámara también es controlable.

La deposición de los materiales se ha realizado de dos maneras distintas: para estudiar la calidad del material aislante se han utilizado máscaras metálicas y para la fabricación de los dispositivos se ha utilizado resina patronada, preparada mediante técnicas de fotolitografía, que se introducen en la siguiente sección.

Los materiales utilizados en la fabricación de los dispositivos son Cr, Cu, Au, Ti, Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> (Permalloy), SiO<sub>2</sub> y Ge. Cada uno de estos materiales juega un papel importante en el funcionamiento de las microbobinas. El cromo se utiliza para mejorar la adherencia entre la oblea de silicio y el cobre. El oro para evitar la oxidación del cobre. El óxido de silicio y el germanio como aislante, para impedir el contacto eléctrico entre las pistas de la bobina y la muestra. El permalloy es el material principal que forma la muestra magnética, y junto con éste se usan titanio y cobre para formar una muestra de estructura multicapa *sandwich*. En el Cuadro 2.2 se muestran los parámetros de deposición de los metales utilizados, que se han depositado bajo las mismas condiciones en todos los casos (presión de Ar de  $3.2 \times 10^{-3}$  mbar y *sputtering* DC). En el caso del Py se utiliza un magnetron especial para blancos magnéticos.

Blanco	Ritmo de deposición (nm/s)	Potencia (W)	Distancia blanco-sustrato (cm)
Cr	0.042	60	11
Cr	0.420	60	10.5
Au	0.500	60	11
Ti	0.067	60	11
Ni <sub>80</sub> Fe <sub>20</sub>	0.420	100	8.5

Cuadro 2.2: Parámetros de deposición de diferentes materiales conductores utilizando *sputtering* DC.

En total se han fabricado dos conjuntos de sensores compuestos por la muestra MI y las microbobinas. En el primero, se ha utilizado SiO<sub>2</sub> como material aislante y la muestra es una única capa de Py. En el segundo el material aislante es Ge y la muestra magnética es una multicapa *sandwich* cuya configuración es (Py/Ti/Py/Ti)/Cu/(Ti/Py/Ti/Py).

Al depositar la capa de Permalloy se ha aplicado un campo magnético de 250 Oe (perpendicular a la muestra) mediante imanes permanentes de NdFeB situados en el porta-sustratos. Con esto se consigue inducir una anisotropía magnética y de esta forma obtener direcciones de fácil imanación. El patronado de las muestras de MI se realiza de modo que esta dirección de fácil imanación (eje fácil) se sitúe transversalmente a la longitud de las muestras, produciendo una anisotropía transversal.

Uno de los pasos más importantes en la fabricación de los dispositivos es conseguir un aislamiento adecuado entre las pistas que configuran la bobina y la muestra de MI

## 2 Experimental

que éstas rodean. El trabajo previo del grupo de investigación había determinado las condiciones óptimas de deposición de los metales que se han utilizado en este proyecto y en trabajos anteriores se había concluido que las capas de SiO<sub>2</sub> depositadas en el laboratorio de la facultad no cumplen los requisitos deseados [7]. Dos maneras de depositar SiO<sub>2</sub> de buena calidad son el *sputtering* reactivo (añadiendo oxígeno a la cámara durante la deposición) o el CVD (*chemical vapor deposition*), entre otras. A pesar de que no es posible realizar estas técnicas en las instalaciones disponibles, se ha intentado de nuevo depositar SiO<sub>2</sub> mediante *sputtering* convencional, cambiando ciertos parámetros. Además del óxido de silicio, también se ha estudiado la posibilidad de utilizar Ge como aislante para estos dispositivos.

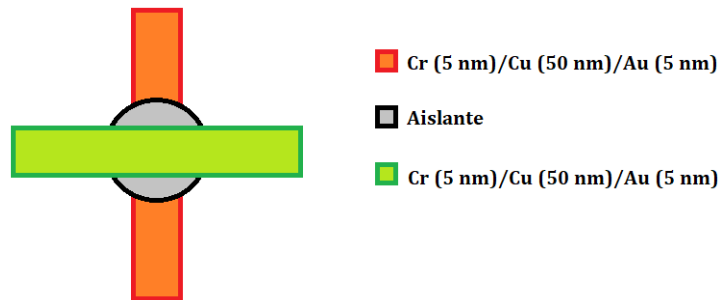


Figura 2.3: Esquema de la deposición de los distintos materiales para el estudio de los aislantes.

Para realizar el estudio de la resistividad de los aislantes se ha planteado un diseño simple de tres elementos: dos contactos en forma de tira colocados en perpendicular y un círculo de aislante en la intersección entre ambos (Figura 2.3). Como en los dispositivos principales, los contactos siguen la configuración Cr/Cu/Au y mantienen los mismos espesores.

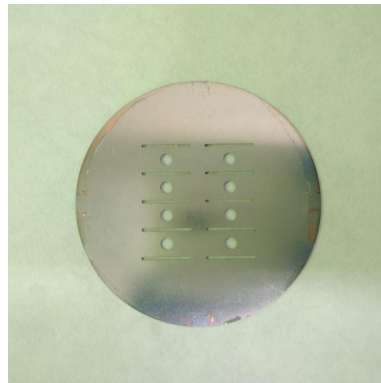


Figura 2.4: Máscara metálica utilizada para la deposición en las pruebas de los materiales aislantes.

Las muestras se han realizado en trozos de oblea cortados mediante la cortadora de



obleas manual con punta de diamante (ATV Technologie GmbH) del Laboratorio de Materiales, y que han sido después lavados mediante el procedimiento habitual. Para realizar la deposición por *sputtering* los trozos se han fijado al portamuestras con cinta adhesiva Kapton. Las máscaras utilizadas son metálicas y cuentan con orificios rectangulares y circulares, que se ajustan perfectamente al diseño planteado para estas pruebas (Figura 2.4). Para evitar depositar elementos innecesarios en la muestra los orificios restantes se han cubierto con Kapton. Todas las deposiciones de los materiales aislantes se han realizado por *sputtering* RF y con una presión de Ar de  $3.2 \times 10^{-3}$  mbar.

Se han realizado cuatro pruebas con distintos grosores de  $\text{SiO}_2$ , todas con una potencia en el *sputtering* de 100 W y a una distancia de la muestra de 11 cm. El tiempo de deposición y el espesor obtenido para cada una de las cuatro muestras realizadas se muestran en el Cuadro 2.3.

Muestra	Tiempo	Espesor aproximado (nm)
1	20'	180
2	10'	85
3	6' 15"	50
4	3' 7"	25

Cuadro 2.3: Tiempos de deposición y espesores para las muestras de  $\text{SiO}_2$ .

Respecto al Ge, se han hecho dos pruebas, ambas mediante una potencia de 60 W y a una distancia del sustrato de 11 cm. El tiempo de deposición y espesor se muestran en el Cuadro 2.4.

Muestra	Tiempo	Espesor aproximado (nm)
1	20'	120
2	10'	60

Cuadro 2.4: Tiempos de deposición y espesores para las muestras de Ge.

Es necesario mencionar que una de las complicaciones notables que se presentan a la hora de caracterizar estas muestras es la dificultad de determinar con exactitud el grosor de la capa depositada. Dado que se han utilizado máscaras metálicas que no están en contacto con la muestra (a diferencia de la resina utilizada en los procesos de fotolitografía), los bordes del material depositado son difusos y carecen de un escalón bien definido que permita medir el grosor de la capa, tarea para la cual se ha utilizado el perfilómetro del Departamento de Electricidad y Electrónica AlphaStep D-100. De los resultados obtenidos se ha deducido que el ritmo de deposición aproximado para el  $\text{SiO}_2$  es de 0.15 nm/s y de 0.10 nm/s para el Ge bajo las condiciones establecidas.

## 2.2. Fotolitografía

La fotolitografía es una de las técnicas fundamentales en la fabricación de circuitos integrados y consiste en transferir un patrón a la superficie de un sustrato mediante resina fotosensible, una máscara y radiación energética. Es un proceso fotográfico por el que un polímero sensible a la luz, la fotorresina, se expone a luz UV a través de una máscara y se revela para formar imágenes sobre el sustrato. La máscara es un elemento transparente en el que los motivos a patronar son opacos. Hay dos tipos de fotorresina: positiva y negativa. Al utilizar fotorresina positiva la parte que se disuelve con el revelador es la que ha sido expuesta a la luz, al contrario que con la negativa, en la que las zonas que se mantienen son las que han sido expuestas (Figura 2.5). Como en este trabajo se utiliza la técnica de *lift-off* para definir los elementos tras la deposición se ha decidido utilizar resina negativa, ya que se obtiene una mejor definición que con la resina positiva.

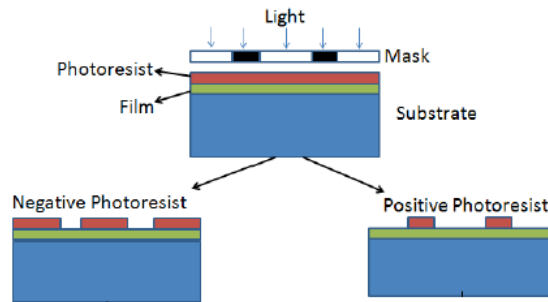


Figura 2.5: Esquema de funcionamiento de los dos tipos de fotorresina.

Una vez patronada la resina sobre la oblea se realiza la deposición de los materiales deseados mediante *sputtering*. Finalmente se elimina la resina y el material que ha quedado sobre ella mediante la técnica de *lift-off*. Todo el proceso está presentado de manera esquemática en la Figura 2.6.

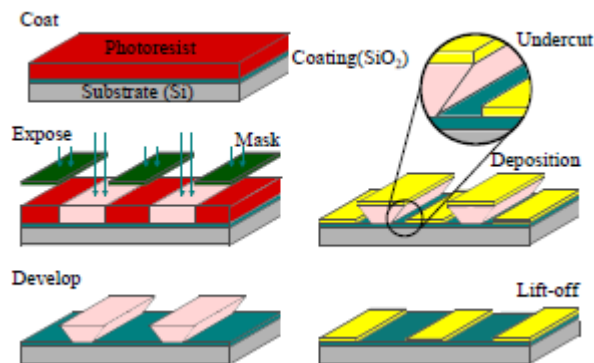


Figura 2.6: Esquema del proceso de fotolitografía y *lift-off*.

El proceso de fotolitografía se realiza en salas especiales llamadas salas blancas donde las condiciones ambientales están controladas. Los parámetros que se tienen en cuenta son el tamaño y concentración de las partículas contaminantes que se encuentran en el aire, la temperatura, humedad, presión del aire, etc [16].



Figura 2.7: Sala blanca de la Facultad de Ciencia y Tecnología.

La fabricación de los sensores se ha realizado en la sala limpia de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la UPV-EHU en Leioa, que a pesar de no ser una sala blanca estándar está adecuadamente preparada y cumple con los requisitos imprescindibles (Figura 2.7). Cuenta con lámparas fluorescentes amarillas, filtros amarillos en las ventanas para evitar la exposición accidental de la resina, filtros de aire para disminuir el número de partículas contaminantes en el aire, deshumidificador y sistema de aire acondicionado para controlar la humedad entre el 40-46 % RH y la temperatura entre 20-25°C. El laboratorio también está equipado con los instrumentos básicos que se emplean en la fotolitografía: lámpara de luz ultravioleta, alineadora de máscaras, placa calefactora, microscopio óptico y baño de ultrasonidos. El proceso de fotolitografía consta de varios pasos que se describen a continuación junto con el funcionamiento básico del equipo utilizado.

### 2.2.1. Limpieza previa

La limpieza es uno de los factores más importantes en todos los procesos de fabricación microelectrónica, de modo que lo primero que se debe hacer es limpiar la oblea de silicio con acetona, isopropanol y agua desionizada en un baño de ultrasonidos (Selecta Ultrasons Medi-II). Entre los baños se seca la oblea usando una pistola de soplado con nitrógeno gaseoso. Los pasos a realizar son los siguientes:

- **5 minutos en acetona.** Este disolvente orgánico elimina las contaminaciones de grasas o aceites. Su alta velocidad de evaporación requiere una etapa posterior de limpieza con alcohol isopropílico.

## 2 Experimental

- **5 minutos en isopropanol.** Este disolvente orgánico se usa para eliminar los restos de acetona.
- **5 minutos en agua desionizada.** Este agua se produce en el laboratorio a partir de una filtración con cartuchos especiales, y contiene baja concentración de cationes y aniones para no contaminar la oblea.

### 2.2.2. Deposición de la fotorresina

En primer lugar se calienta la oblea en la placa calefactora (Pselecta, Paltronic) para eliminar la humedad remanente del lavado. A continuación se deposita una capa de HMDS (*hexamethyldisilazane*) con el sistema de *spin coating* (Laurell Technologies Corporation, modelo WS-400E-CNPP-Lite) para mejorar la adhesión entre la oblea y la resina [7]. El siguiente paso es extender la resina, también mediante *spin coating*. Se ha empleado la resina ma-N 1410 de Microresist Technology. Finalmente se calienta la oblea en la placa durante 90 segundos a 100°C para eliminar los disolventes de la resina. Cada uno de los materiales precisa de una velocidad concreta de centrifugado, que define el grosor de la capa que se obtendrá. Además de esta velocidad máxima de rotación los programas del *spinner* cuentan con etapas iniciales y finales para llegar a la velocidad máxima y detener la rotación, respectivamente. La velocidad máxima para la resina es de 3000 rpm, con lo que se consigue un espesor de 1  $\mu\text{m}$  según el fabricante; para el HMDS es de 2000 rpm. En la Figura 2.8 se pueden ver los dos aparatos que se utilizan en este paso de la fotolitografía.

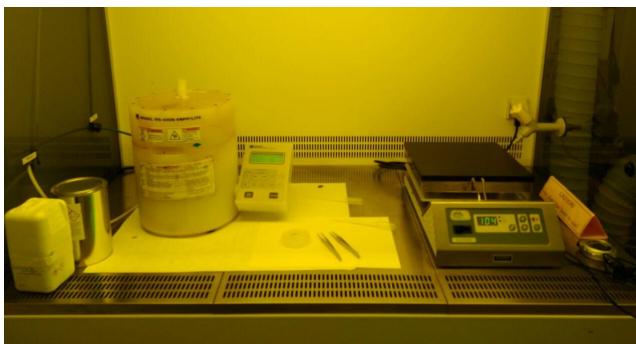


Figura 2.8: Estación de la sala blanca que cuenta con el *spinner* y la placa calefactora.

### 2.2.3. Exposición

Para realizar el patronado de la resina el laboratorio dispone de un sistema que consta de una fuente de luz UV, una alineadora de máscaras y un microscopio óptico. Ha sido diseñado y fabricado por Suministro de Materiales y Asistencia S.L. En la Figura 2.9 se muestra la disposición de los tres sistemas. La resina negativa ma-N 1410 es sensible a la luz UV de 365 nm que emite la lámpara de mercurio de 200 W. La fuente de luz de la sala blanca es el modelo LS-100-2 de Bachur and Associates. La intensidad de la luz que

produce la fuente es controlable. Antes de la exposición de la resina es conveniente medir y regular la intensidad de la luz. En los procesos realizados la potencia de la fuente suele ser  $14.5 \text{ mW/cm}^2$  y dado que según el fabricante la irradiación necesaria para sensibilizar la resina es de  $350 \text{ mJ/cm}^2$ , se ha determinado que el tiempo de exposición a la luz UV es de 24 s.



Figura 2.9: Equipo de alineación y exposición de la sala blanca de la Facultad de Ciencia y Tecnología.

La alineadora de máscaras permite ajustar con precisión la posición relativa de la máscara y el sustrato, de manera que es posible alinear correctamente los pasos siguientes. El proceso de alineación se realiza utilizando unos motivos especiales impresos en la máscara, diseñados para esta tarea y que reciben el nombre de motivos de alineamiento (Figura 2.10).

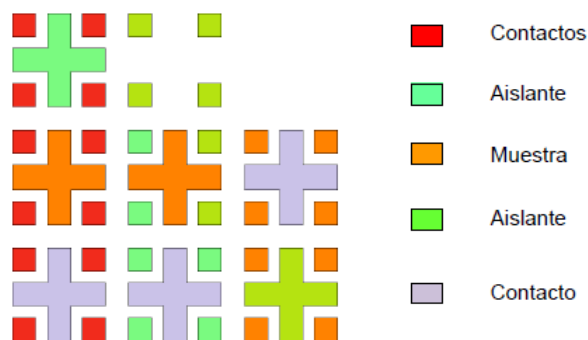


Figura 2.10: Motivos de alineamiento presentes en las máscaras.

Las máscaras son de vidrio y los motivos están definidos en cromo. Han sido diseñadas usando instrumentos de CAD y fabricadas por JD Photo-Tools.

El diseño de estas máscaras contempla la fabricación de diferentes microbobinas. Las dimensiones exteriores son iguales en los 98 dispositivos, la diferencia está en la anchura de pista de las bobinas y el número de vueltas. Las anchuras de pista son 10, 20, 30

## 2 Experimental

y  $40\ \mu\text{m}$  (68, 48, 37 y 32 vueltas, respectivamente). En la Figura 2.11 se muestran las dimensiones exteriores de las microbobinas.

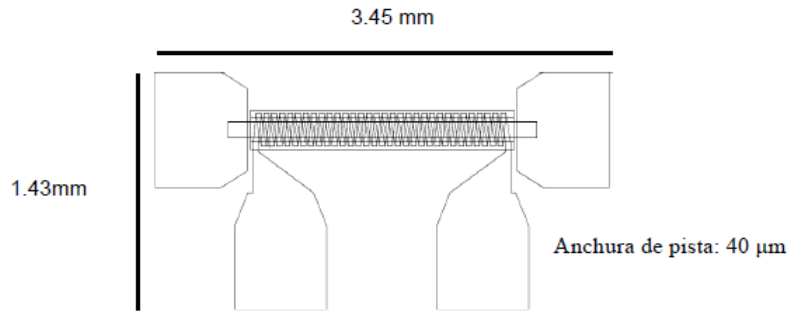


Figura 2.11: Dimensiones de las microbobinas. El esquema corresponde a un dispositivo cuya anchura con anchura de pista de  $40\ \mu\text{m}$ .

### 2.2.4. Revelado

Después de la exposición a la luz UV se sumerge la oblea en un revelador adecuado para eliminar la resina correspondiente, en este caso la que no ha sido expuesta a la luz, por ser resina negativa. Así se consigue el patrón deseado. Se ha empleado el revelador ma-D 533s de Microresist Technology cuyo principal componente es el *ethylammonium hydroxide*.

El tiempo y la agitación necesaria para realizar el revelado dependen de tres factores: tipo y espesor de la resina y condiciones de la exposición. En este trabajo se han mantenido siempre las mismas condiciones, de modo que el revelado ha sido de 70 s con la oblea sumergida en un baño de ultrasonidos a  $21^{\circ}\text{C}$ . Estos valores los indica el proveedor de manera que se asegura la obtención de un *under-etch* de aproximadamente una micra. El *under-etch* es fundamental ya que hace que la capa depositada no sea continua y facilita la obtención de unos elementos bien definidos tras el *lift-off* (Figura 2.12).

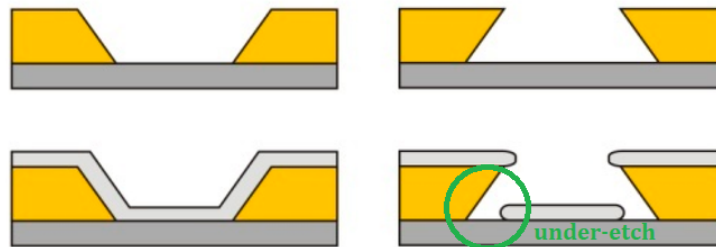


Figura 2.12: Diferencia entre una deposición sobre resina sin (izq.) y con (dcha.) *under-etch* [17].

Para detener la reacción química que provoca el revelador, al acabar el tiempo se limpia concienzudamente la oblea en un vaso precipitado con agua desionizada, para finalmente secarla con nitrógeno gaseoso usando una pistola de secado.

### 2.2.5. Deposición por *sputtering*

Una vez obtenido el patrón deseado, se procede a depositar los materiales escogidos mediante *sputtering*. En el Cuadro 2.5 se muestran los materiales depositados, sus espesores y la función que cumplen. En la primera oblea se ha depositado SiO<sub>2</sub> como aislante y la muestra de MI es una estructura monocapa de Py, mientras que en la segunda oblea se ha depositado Ge como aislante y la muestra es una multicapa *sandwich* de estructura (Py/Ti/Py/Ti)/Cu/(Ti/Py/Ti/Py).

	Material	Espesor (nm)	Función	
1 <sup>a</sup> capa	Cr	5	Mejorar adherencia entre la oblea y el Cu	
	Cu	50		Material conductor
	Au	5		Evitar la oxidación del Cu
2 <sup>a</sup> capa	SiO <sub>2</sub>	50	Aislante en la oblea 1	
	Ge	60	Aislante en la oblea 2	
3 <sup>a</sup> capa	Py	150	Muestra MI multicapa <i>sandwich</i> (oblea 2)	
	Py	100		
	Ti	6		
	Py	100		
	Ti	6		
	Cu	200		
	Ti	6		
	Py	100		
	Ti	6		
	Py	100		
4 <sup>a</sup> capa	SiO <sub>2</sub>	50	Aislante en la oblea 1	
	Ge	60	Aislante en la oblea 2	
5 <sup>a</sup> capa	Cr	5	Mejorar adherencia entre la oblea y el Cu	
	Cu	50		Material conductor
	Au	5		Evitar la oxidación del Cu

Cuadro 2.5: Espesores y funciones de los materiales depositados mediante *sputtering*.

### 2.2.6. *Lift-off*

Una vez se ha depositado el material correspondiente a cada etapa de la fabricación, el siguiente paso es retirar la resina que se ha mantenido tras la exposición y con ella el material que se ha depositado encima. De esta manera obtenemos las figuras correspondientes a cada etapa.

Para ello es necesario sumergir la muestra en un vaso de precipitados con acetona durante aproximadamente una hora, de manera que la resina se disuelve y el material sobrante se separa de la oblea. El siguiente paso consiste en un lavado en ultrasonidos también con acetona, tras lo que se realiza una inspección visual para comprobar que el material se ha desprendido satisfactoriamente. En caso contrario se repite el lavado con

## 2 Experimental

acetona en ultrasonidos durante el tiempo necesario. A continuación, se termina lavando la oblea como se ha explicado en la subsección 2.2.1.

### 2.3. Medidas de resistencia

Una parte fundamental de este trabajo ha consistido en encontrar materiales adecuados que cumplan la función de aislar eléctricamente la muestra de MI y las pistas de la microbobina, como se ha mencionado en la sección 2.1. Por ello, se han realizado pruebas de resistencia de dos materiales,  $\text{SiO}_2$  y Ge, tanto en los propios dispositivos como en unas muestras diseñadas para esta tarea. A continuación se describen los métodos utilizados para realizar estas medidas.

#### 2.3.1. Medidas de resistencia de los materiales aislantes

Para realizar las medidas de resistencia en las pruebas de los materiales aislantes se ha construido un soporte de plástico con dos enganches sujetos por tornillos para colocar la muestra. El soporte cuenta con una pequeña placa de tiras de cobre donde se han soldado cuatro cables, uno para cada una de las puntas de la cruz. Los contactos de la muestra a las tiras de cobre se han realizado con hilos de oro y tintura de plata (Figura 2.13.a).

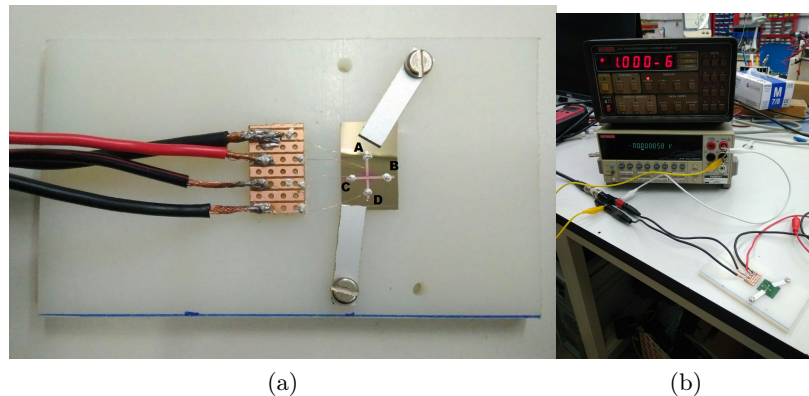


Figura 2.13: Soporte para las medidas de resistencia (a) y configuración para la medida de resistencia a cuatro puntas (b).

Las medidas de resistencia de las muestras se han realizado mediante el método de medida a cuatro puntas o método de Kelvin. La ventaja clave de esta técnica es que elimina la contribución de la resistencia de cableado, y por ello es muy útil para medir resistencias de bajo valor [18]. Este método consiste en hacer circular por la muestra una corriente conocida y medir la caída de tensión que se da en ella, de manera simultánea. La configuración planteada se puede ver en la Figura 2.13.b. Los aparatos utilizados son la fuente de corriente programable 224 y el multímetro digital 2010, ambos de Keithley.



### 2.3.2. Medidas de resistencia en los dispositivos

Con el fin de medir los valores de resistencia entre la bobina y la muestra se ha fabricado, mediante un proceso de grabado con ácido, un conjunto de placas de circuito impreso sencillas, que cuentan con cuatro tiras rectangulares colocadas estratégicamente, de manera que es posible hacer unos contactos simples desde el dispositivo hasta dichas tiras, y medir sobre ellas los valores de resistencia. Los contactos entre la muestra y las tiras se han realizado mediante hilo de oro y tintura de plata (Figura 2.14).

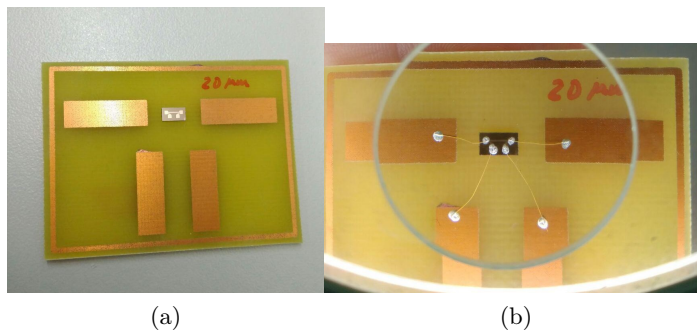


Figura 2.14: PCBs fabricadas para la medida de resistencia de los dispositivos.

Las medidas de resistencia en estos dispositivos se han realizado empleando un multímetro digital de la marca Agilent de modelo 34401A con 6 dígitos y medio, haciendo contacto entre las tiras de la PCB y las puntas del multímetro.

## 2.4. Medidas de MI

Las medidas de MI de cintas e hilos se realizan a frecuencias más bajas que en el caso de películas delgadas [19, 20]. A frecuencias bajas el efecto pelicular en películas delgadas es irrelevante, ya que la profundidad de penetración del campo es mayor que el espesor de la muestra. Las medidas eléctricas a las frecuencias adecuadas para las películas delgadas se realizan empleando técnicas de radiofrecuencia, mediante líneas de transmisión. Esto se debe a que la onda electromagnética del campo es comparable con el tamaño del circuito que se está midiendo, pero también a que estas técnicas permiten un control más adecuado de las impedancias parásitas. Todas las medidas de MI se han realizado a temperatura ambiente.

Las líneas de transmisión son estructuras que se utilizan para transmitir energía entre dos puntos en forma de onda electromagnética y adaptar impedancias. El modo TEM (transversal electromagnético) se caracteriza por que los campos magnéticos que forman la onda son perpendiculares a la dirección en la que se propaga la energía. Por esta razón no existen componentes de campos en la dirección axial (dirección en la que se propaga la energía) [21]. Hay diferentes tipos de líneas de transmisión: coaxiales, bifilares, planares, etc. [21].

En este trabajo se han utilizado líneas de transmisión planares, aquellas formadas por dos o más conductores planos paralelos. Dentro de las líneas planares de transmisión

## 2 Experimental

existen varios tipos: líneas *microstrip*, *stripline*, *coplanares* y *slotline* entre otras [22]. En concreto, para realizar las medidas de MI de este proyecto se han utilizado líneas *microstrip*, que consisten en una franja de conducción separada de la franja de masa por una capa de sustrato dieléctrico [23]. En la Figura 2.15 se muestra el diseño de una línea *microstrip*.

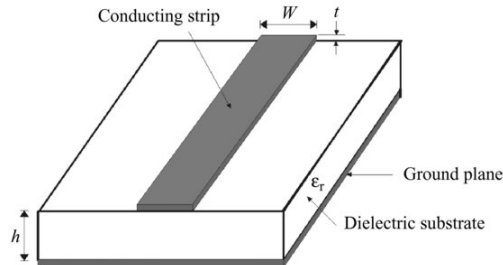


Figura 2.15: Diseño de una línea *microstrip* [24].

En las líneas *microstrip* es fácil establecer una impedancia característica de  $50 \Omega$  ajustando la anchura del conductor ( $W$ ), la permitividad ( $\epsilon_r$ ), el espesor del dieléctrico ( $h$ ), y la conductividad ( $\sigma$ ) y espesor ( $t$ ) del conductor.



Figura 2.16: Distribución de campos de la línea *microstrip* [25].

En estas líneas hay cambios bruscos aire-dieléctrico que impiden que existan modos TEM, TE y TM puros, pero la mayor parte de la energía se propaga a modo de TEM, extendiéndose a lo largo de la línea, propagándose una parte por el aire y otra por el sustrato, como se muestra en la Figura 2.16.



Figura 2.17: Portamuestras realizado en una placa PCB con las líneas *microstrip* y los conectores SMA.

Las líneas *microstrip* son fáciles de diseñar y fabricar en placas de circuito impreso. El

diseño utilizado para este proyecto cuenta con dos tramos de línea, adaptados ambos a una impedancia característica de  $50 \Omega$ . Las líneas de transmisión terminan en conectores SMA (*SubMiniature version A*) donde se conectan los cables coaxiales (con  $50 \Omega$  de impedancia característica) que van a los instrumentos de medida. Los conectores de base cuadrada están soldados mediante una aleación metálica 60/40 estaño/plomo. En la Figura 2.17 se muestra el dispositivo junto a las conexiones a las líneas *microstrip* y los conectores SMA.

Los 98 dispositivos se fabrican de forma paralela en la oblea, de modo que es necesario separarlos para realizar las medidas. Cada uno de ellos se ha separado en un pequeño elemento de forma rectangular utilizando la cortadora de obleas manual (mencionada en la sección 2.1). Una vez cortadas se han pegado en el portamuestras con las líneas *microstrip* con los conectores ya soldados. Para realizar los contactos entre los tramos de línea y los conectores del dispositivo se han utilizado hilos de oro de 0.05 mm de diámetro y tintura de plata.

Para caracterizar la MI de la muestra se ha utilizado el sistema experimental disponible en el Laboratorio de Magnetismo. El campo magnético se aplica con un par de bobinas Helmholtz en cuyo centro se consigue una constante de campo de 23.71 Oe/A. El sistema proporciona una resolución de campo de 0.02 Oe.

Las medidas de impedancia en función de la frecuencia se realizan con un analizador de redes Agilent E5071C capaz de trabajar en un rango de frecuencias desde 9 kHz hasta 8.5 GHz. Para realizar una medida de MI se determinan los valores de campo para los que se va a medir la impedancia y los parámetros de medida del analizador (rango de frecuencia, número de puntos, parámetros de dispersión, ancho de banda y número de promedios). Los parámetros fijados para las medidas se muestran en el Cuadro 2.6. Para cada valor de campo se mide la impedancia en función de la frecuencia. Todas las medidas se han realizado en el modo de reflexión.

El proceso de medida está controlado por un programa de control implementado en LabVIEW. Las señales analógicas y digitales se manejan mediante una tarjeta de adquisición de datos National Instruments NI-USB-6259.

Rango de frecuencias (MHz)	Nº de puntos	Campo aplicado (Oe)	Ancho de banda del filtro IF (kHz)
0.15-300	801	0-150	5

Cuadro 2.6: Parámetros fijados en el analizador de redes para las medidas de MI.



## 3 Resultados

En este apartado se describen los resultados obtenidos en la fabricación de los microsensores, junto con la caracterización de los mismos y de los materiales que se han planteado como posibles aislantes. También se muestran los resultados de la caracterización de la magneto-impedancia de los dispositivos.

### 3.1. Fabricación de los dispositivos

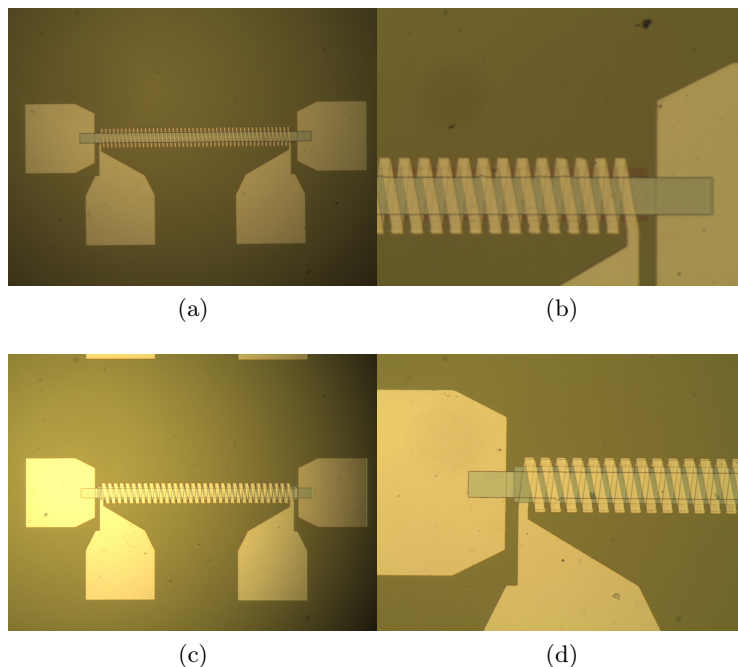


Figura 3.1: Imágenes obtenidas mediante microscopio óptico. Los dispositivos del primer conjunto con  $\text{SiO}_2$  como aislante y una estructura monocapa de Py como muestra de MI son (a) con una anchura de pista de  $20 \mu\text{m}$  y (b) con  $30 \mu\text{m}$ . Los del segundo conjunto con Ge como aislante y una muestra de MI multicapa *sandwich* son (c) y (d), ambos con anchura de pista de  $40 \mu\text{m}$ .

En este trabajo se han fabricado dos conjuntos de dispositivos formados por la muestra de MI y la microbobina. En el primero se han utilizado  $50 \text{ nm}$  de  $\text{SiO}_2$  y la muestra de MI es una estructura monocapa de Py de  $150 \text{ nm}$ , mientras que en el segundo conjunto

### 3 Resultados

se han depositado 60 nm de Ge como aislante y la muestra es una multicapa *sandwich* de estructura (Py/Ti/Py/Ti)/Cu/(Ti/Py/Ti/Py). En la Figura 3.1 se pueden ver ejemplos de los microsensors fabricados.

En ambos conjuntos el resultados del proceso de fabricación es satisfactorio ya que los elementos están bien definidos y hay contacto entre las dos capas que forman las microbobinas. En el segundo conjunto, sin embargo, la alineación no se ha realizado tan bien como en el primero y se puede apreciar que las capas que forman la microbobina no están perfectamente alineadas, a pesar de que hay contacto entre ellas. Este defecto de alineación puede provocar que no haya buen contacto eléctrico entre las pistas que forman la microbobina.

## 3.2. Medidas de resistencia

En esta sección se muestran los resultados de las medidas de resistencia de los dos materiales aislantes estudiados y de los dispositivos que se han fabricado en este trabajo.

### 3.2.1. Medidas de resistencia de los materiales aislantes

Si nos referimos a la Figura 2.3 en la sección 2.1, los valores ideales de las medidas de resistencia han de ser dos: valor de resistencia despreciable entre las puntas de una misma línea de la cruz, y resistencia de valor muy alto (idealmente infinita, o circuito abierto) entre las puntas que no corresponden a la misma línea de la cruz. En los dos apartados siguientes se muestran los valores de dichas medidas para las pruebas realizadas con óxido de silicio y germanio.

#### 3.2.1.1. Pruebas de aislamiento de óxido de silicio

Los valores obtenidos para cada una de las cuatro muestras de SiO<sub>2</sub> se pueden ver en el Cuadro 3.1 junto con los valores deseados para cada conexión. Ninguna de las muestras ha dado los resultados que se necesitan para un aislamiento adecuado. A pesar de esto es conveniente explicar los valores obtenidos en cada una.

	Grosor SiO <sub>2</sub> (nm)	R <sub>AB</sub> (Ω)	R <sub>AC</sub> (Ω)	R <sub>AD</sub> (Ω)	R <sub>BC</sub> (Ω)	R <sub>BD</sub> (Ω)	R <sub>CD</sub> (Ω)
ideal	-	∞	∞	7	7	∞	∞
muestra 1	180	400 × 10 <sup>6</sup>	400 × 10 <sup>6</sup>	37	300 × 10 <sup>6</sup>	397 × 10 <sup>6</sup>	300 × 10 <sup>6</sup>
muestra 2	85	24	30	26	30	28	33
muestra 3	50	7.15 × 10 <sup>3</sup>	7 × 10 <sup>3</sup>	29	33	7.2 × 10 <sup>3</sup>	7.2 × 10 <sup>3</sup>
muestra 4	25	23	20	14	12	29	26

Cuadro 3.1: Valores de resistencia obtenidos en las pruebas de SiO<sub>2</sub>.

En la muestra 1 los valores parecen ideales (del orden de los megaohmios). Sin embargo también se obtiene una resistencia de dicha magnitud en un contacto que debería ser de resistencia despreciable. Una inspección visual permite ver que la muestra está rota

(Figura 3.2.a), por lo que se ha deducido que el grosor de esta capa de  $\text{SiO}_2$  hace que las tensiones internas del material sean tan grandes que éste se acaba rompiendo.

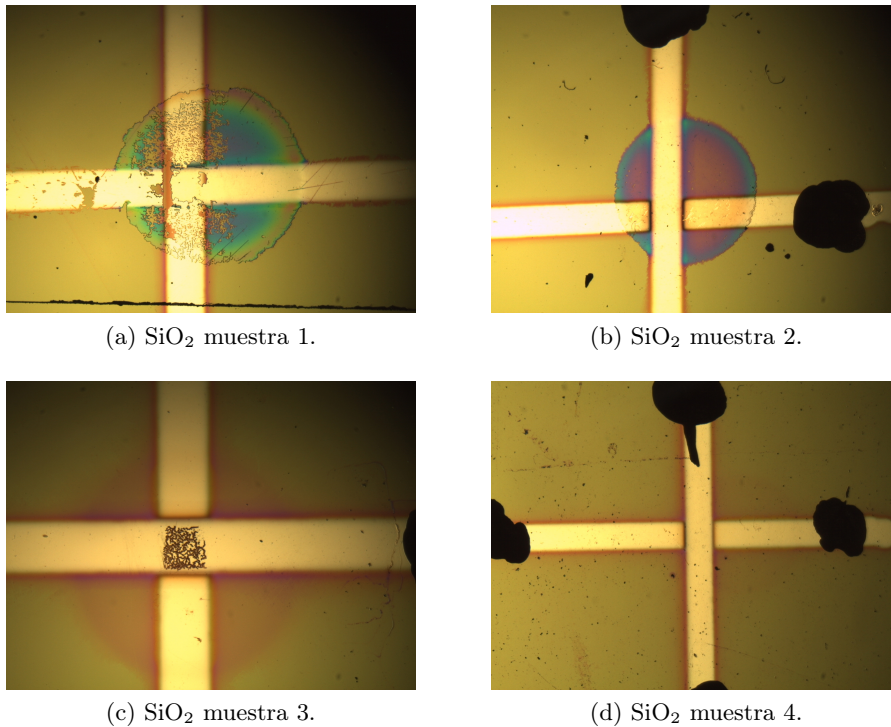


Figura 3.2: Imágenes obtenidas mediante el microscopio óptico de la sala blanca de las muestras de resistencia.

Respecto a la muestra 2, los valores que se muestran en el Cuadro 3.1 son los obtenidos tras varias medidas. Inicialmente las resistencias medidas eran del orden de los kilo ohmios en los puntos que debían estar aislados y ohmios en los que debían conducir. Por esta razón se consideró que este espesor de óxido era el adecuado. Las medidas se repitieron tras varias horas y los valores cambiaron drásticamente hasta llegar a los que se muestran en el Cuadro 3.1.

La muestra 3 parece la más prometedora, dado que se han obtenido resistencias del orden de los kilo ohmios en los puntos que deberían estar aislados y valores casi despreciables en los puntos donde hay conducción. En esta muestra también se ha dado una variación de los valores, pero no comparable a los cambios que se han dado en la muestra 2. Otro factor a tener en cuenta a la hora de escoger el material aislante para los dispositivos finales es el espesor de la capa ya que si es demasiado gruesa los siguientes pasos de fabricación se verán comprometidos. El grosor de esta capa (50 nm) es aceptable puesto que es comparable al grosor de los contactos que se utiliza en los dispositivos finales.

En la muestra 4 los resultados son insatisfactorios, probablemente a causa de su reducido espesor.

La conclusión de estas pruebas es que no es posible depositar capas de óxido de silicio

### 3 Resultados

con buenas propiedades aislantes mediante *sputtering*. Dos formas de depositar SiO<sub>2</sub> de buena calidad son el CVD (*chemical vapor deposition*) o el *sputtering* reactivo, en el que se añade oxígeno a la cámara durante la deposición.

#### 3.2.1.2. Pruebas de aislamiento de germanio

Respecto al germanio, los valores obtenidos se presentan en el Cuadro 3.2, de nuevo junto con los valores ideales para cada caso.

	Grosor Ge (nm)	R <sub>AB</sub> (Ω)	R <sub>AC</sub> (Ω)	R <sub>AD</sub> (Ω)	R <sub>BC</sub> (Ω)	R <sub>BD</sub> (Ω)	R <sub>CD</sub> (Ω)
<b>ideal</b>	-	∞	∞	7	7	∞	∞
<b>muestra 1</b>	120	50 × 10 <sup>6</sup>	50 × 10 <sup>6</sup>	22	25	50 × 10 <sup>6</sup>	50 × 10 <sup>6</sup>
<b>muestra 2</b>	60	15	26	29	19	30	17

Cuadro 3.2: Valores de resistencia obtenidos en las pruebas de Ge.

La muestra 2 ha sido directamente descartada ya que los valores obtenidos no son válidos para su uso como aislante. Con la muestra 1, sin embargo, se han realizado más pruebas.

Dado que el germanio es un material semiconductor la resistencia de la muestra varía según su temperatura (cuanto mayor es la temperatura de la muestra, menor es su resistencia), por lo que se ha visto conveniente cuantificar esa variación. Para ello se han hecho pasar por la muestra (siempre midiendo la resistencia R<sub>AB</sub>) distintos valores de corriente, ya que cuanto mayor es la corriente que se hace pasar por la muestra, mayor tiene que ser también su temperatura. La potencia generada por la corriente ( $I$ ) que la atraviesa es [26]:

$$P = R_T I^2 \quad (3.1)$$

Además, la potencia disipada por la muestra a una temperatura  $T$  en contacto con el medio a una temperatura  $T_a$  es [26]:

$$P = \delta(T - T_a) \quad (3.2)$$

siendo  $\delta$  el coeficiente de disipación térmica. Rápidamente se alcanza una situación de equilibrio en la que ambas potencias son iguales, esto es,

$$R_T I^2 = \delta(T - T_a) \quad (3.3)$$

De modo que al aumentar la corriente, aumenta también la temperatura.

$$R_T(T) = R_0 \exp \left[ B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (3.4)$$

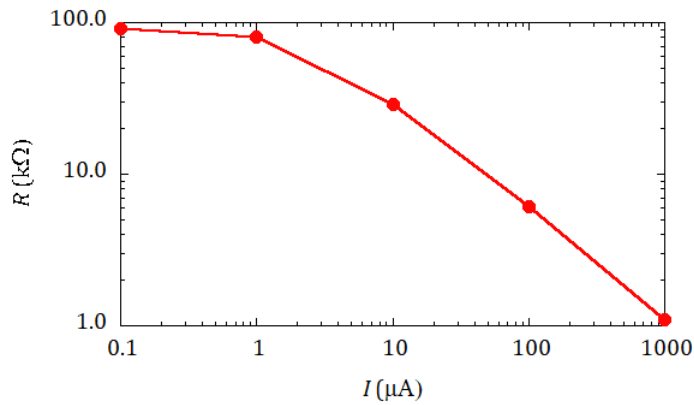
A pesar de esto, al ser la muestra un material semiconductor cuya variación de la resistencia en función de la temperatura se describe por la ecuación 3.4 (siendo  $R_0$  la



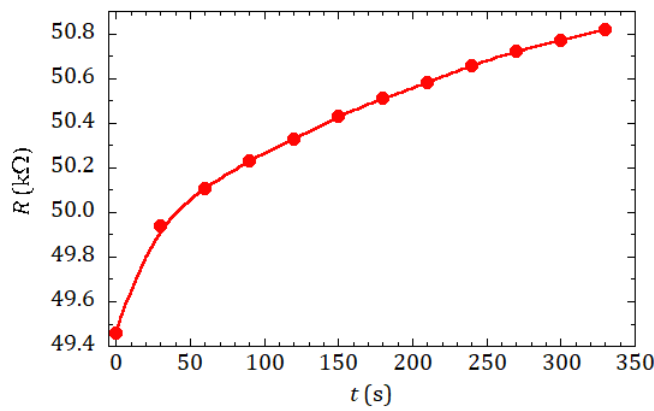
resistencia a la temperatura de referencia  $T_0$ ), la ecuación 3.3 se convierte en una ecuación que sólo puede resolverse de forma numérica.

Se ha comprobado de manera experimental que al aumentar la corriente que se hace pasar por la muestra aumenta su temperatura y por tanto disminuye la resistencia. Este comportamiento se puede ver en la Figura 3.3.a en representación log-log.

También se ha observado que la situación de equilibrio descrita por la ecuación 3.3 no es estática sino que varía en función del tiempo hasta llegar a un valor final. Si se hace pasar una corriente constante a través de la muestra durante un cierto tiempo se puede observar que el valor de resistencia aumenta ligeramente (Figura 3.3.b).



(a)



(b)

Figura 3.3: Valores de resistencia ( $R_{AB}$ ) en función de la corriente (a) y el tiempo (b).

Con todo se ha decidido que los valores de resistencia obtenidos son adecuados para esta aplicación y en el segundo conjunto de dispositivos fabricado se ha depositado una capa de Ge de 60 nm como aislante en las etapas 2 y 4 en las mismas condiciones que la muestra 1.

## 3.2.2. Medidas de resistencia de los dispositivos

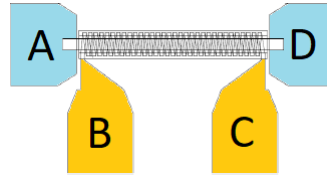


Figura 3.4: Esquema de la designación de los contactos para las medidas de resistencia en las microbobinas.

Para las medidas de resistencia de los dispositivos se ha utilizado un código alfabético (Figura 3.4) para designar cada uno de los contactos. De esta manera, la resistencia entre las parejas de contactos A y D y B y C debería tener un valor despreciable en comparación con las demás posibles combinaciones, en las que idealmente se debería obtener valor de resistencia infinito. Los dispositivos que se han utilizado para estas pruebas han sido escogidos de entre los que habían pasado una inspección visual.

	$R_{AB}$ ( $\Omega$ )	$R_{AC}$ ( $\Omega$ )	$R_{AD}$ ( $\Omega$ )	$R_{BC}$ ( $\Omega$ )	$R_{BD}$ ( $\Omega$ )	$R_{CD}$ ( $\Omega$ )
ideal	$\infty$	$\infty$	60	77	$\infty$	$\infty$
disp. 1 (10 $\mu\text{m}$ )	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
disp. 2 (10 $\mu\text{m}$ )	41.7	$\infty$	$3.15 \times 10^6$	$\infty$	$3.25 \times 10^6$	$\infty$
disp. 3 (20 $\mu\text{m}$ )	134.6	174.6	116	287	230	59
disp. 4 (20 $\mu\text{m}$ )	100	$3 \times 10^6$	87	$10 \times 10^6$	137	$5 \times 10^6$
disp. 5 (30 $\mu\text{m}$ )	80.4	147	83.1	204	139	48
disp. 6 (30 $\mu\text{m}$ )	31	99	84	118	102	26
disp. 7 (40 $\mu\text{m}$ )	31.2	102.9	82	121.1	100	34
disp. 8 (40 $\mu\text{m}$ )	21	105	83	115	95	40

Cuadro 3.3: Valores de resistencia obtenidos en los dispositivos del primer conjunto ( $\text{SiO}_2$ ).

Los resultados para los dispositivos del conjunto de dispositivos con  $\text{SiO}_2$  como aislante se muestran en el Cuadro 3.3.

En ningún dispositivo se han obtenido valores de resistencia suficientemente altos entre los contactos que requieren aislamiento. A pesar de que en las pruebas de resistencia del

óxido de silicio para un espesor de 50 nm (subsección 3.2.1.1) se han obtenido valores adecuados para los dispositivos que se han fabricado, las pruebas en los dispositivos han resultado en valores muy distintos. Esto podría ser a causa de los múltiples procesos por los que pasan las obleas en el proceso de fabricación, que podrían degradar el material.

Se puede ver además que los dispositivos que peores resultados dan son los de grosor de pista de 10 y 20  $\mu\text{m}$ , ya que por los valores que se han obtenido se puede deducir que no se ha conseguido un buen contacto de las pistas. Con respecto a los dispositivos de mayor grosor de pista, se aprecia que los valores se mantienen en el mismo orden de magnitud y a pesar de que no se ha conseguido un aislamiento adecuado, las resistencias obtenidas indican que en estos dispositivos se ha conseguido un buen contacto entre las dos capas que forman la microbobina..

Los valores de resistencia obtenidos en el segundo conjunto de dispositivos (con Ge como aislante), se muestran en el Cuadro 3.4.

	$R_{AB}$ ( $\Omega$ )	$R_{AC}$ ( $\Omega$ )	$R_{AD}$ ( $\Omega$ )	$R_{BC}$ ( $\Omega$ )	$R_{BD}$ ( $\Omega$ )	$R_{CD}$ ( $\Omega$ )
ideal	$\infty$	$\infty$	0	0	$\infty$	$\infty$
disp. 1 (10 $\mu\text{m}$ )	30.9	65.3	5.2	101.4	41.2	63.6
disp. 2 (10 $\mu\text{m}$ )	39.0	$22.1 \times 10^3$	4.3	$18.0 \times 10^3$	41.0	$1.2 \times 10^3$
disp. 3 (20 $\mu\text{m}$ )	15.7	$1.2 \times 10^6$	5.2	$1.2 \times 10^6$	18.3	$1.2 \times 10^6$
disp. 4 (20 $\mu\text{m}$ )	18.3	$1.4 \times 10^6$	5.4	$1.4 \times 10^6$	21.3	$1.4 \times 10^6$
disp. 5 (30 $\mu\text{m}$ )	12.9	$0.3 \times 10^6$	5.2	$0.3 \times 10^6$	15.1	$0.3 \times 10^6$
disp. 6 (30 $\mu\text{m}$ )	11.4	$0.3 \times 10^6$	4.5	$0.4 \times 10^6$	13.1	$0.1 \times 10^6$
disp. 7 (40 $\mu\text{m}$ )	12.2	44.6	4.9	34.4	11.5	25.2
disp. 8 (40 $\mu\text{m}$ )	15.6	$1.5 \times 10^6$	4.6	$1.5 \times 10^6$	18.6	$1.2 \times 10^6$

Cuadro 3.4: Valores de resistencia obtenidos en los dispositivos del segundo conjunto (Ge).

De nuevo no se han obtenido los valores que se esperaban y no hay aislamiento entre las capas que forman la bobina y la muestra de MI. Tras varias pruebas se ha deducido que esto se debe a un cambio de blanco en el proceso de *sputtering*. Durante la deposición de la primera capa de Ge en el segundo conjunto de dispositivos se rompió el blanco de Ge (debido al *shock* térmico), por lo que fue necesario comprar otro blanco, que resultó no ser germanio puro sino germanio dopado de tipo N, lo que lo convierte en un material conductor.

Además los únicos dispositivos fabricados adecuadamente de entre los que se han uti-

lizado para estas medidas son el 1 y el 7, lo que confirma que los procesos de alineación de este conjunto se han realizado peor que los del anterior.

### 3.3. Caracterización de la magneto-impedancia

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de la magneto-impedancia de las muestras de los dispositivos fabricados. La bobina incluida en el diseño de los sensores permite aumentar el rendimiento de los dispositivos ya que da la posibilidad de medir la MI fuera de la diagonal, hacer una realimentación o polarizar la muestra en un punto de campo magnético distinto a cero. A pesar de que no se ha conseguido una fabricación satisfactoria de las bobinas, la caracterización de la MI de las muestras es una parte importante del trabajo. En el primer conjunto se ha depositado una estructura monocapa de Py y en el segundo conjunto una multicapa *sandwich* con la configuración (Py/Ti/Py/Ti)/Cu/(Ti/Py/Ti/Py). Los dispositivos escogidos para ambas medidas tienen un ancho de pista de 40  $\mu\text{m}$ .

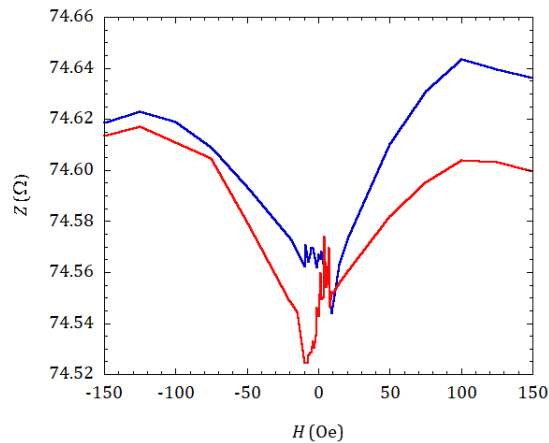


Figura 3.5: Representación de la curva  $Z$  ( $\Omega$ ) vs  $H$  (Oe) para una muestra del primer conjunto a una frecuencia de 40 MHz. La línea roja es la obtenida con los valores de campo descendentes, la línea azul con los ascendentes.

Para el sensor del primer conjunto, el resultado a una frecuencia de 40 MHz se muestra en la Figura 3.5. En esta curva no se ha obtenido el perfil característico de doble pico que aparece en la Figura 1.2 sino que presenta un único pico hacia abajo. Esto se debe a que esta muestra no presenta el efecto de la MI sino de la magneto-resistencia, a causa del reducido espesor de la monocapa de Py que se ha depositado (150 nm): para una muestra con estas características a una frecuencia del orden de los megahercios la profundidad de penetración  $\delta$  tiene un valor aproximado de 1  $\mu\text{m}$ , casi mil veces mayor que el grosor de la muestra.

El comportamiento está dominado por la magneto-resistencia anisótropa (MR) que presenta el Py. Si en una muestra con imanación transversal se hace pasar una corriente en dirección longitudinal, el valor mínimo de resistencia se obtiene en el punto cero de

### 3.3 Caracterización de la magneto-impedancia

campo, y va aumentando según aumenta el valor absoluto de campo. En la Figura 3.6 se muestra la forma típica de una curva de MR para una muestra con imanación transversal.

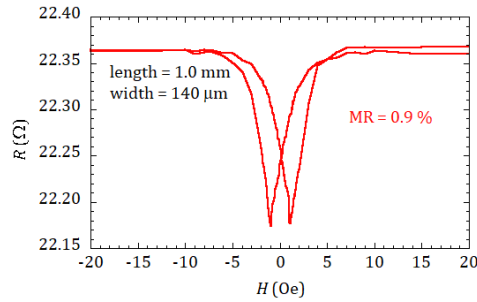


Figura 3.6: Curva de MR medida en DC de una muestra monocapa de Py de 1 mm de largo y 140  $\mu\text{m}$  de grosor (no fabricada en este trabajo).

La curva de la muestra fabricada en este trabajo que se muestra en la Figura 3.5 presenta además unas irregularidades dado que la muestra de Py no es completamente plana. También se aprecia un aumento lineal de la resistencia sumado al efecto de la MR a causa de aumento de temperatura. Al realizar las medidas se comienza con el valor de campo más alto (150 Oe), se va reduciendo hasta llegar al más bajo (-150 Oe) y desde ahí se aumenta otra vez hasta llegar al valor más alto. Esta medida puede llevar unos minutos con lo que durante todo el proceso la muestra se va calentando. Esto explica la inclinación de las curvas puesto que al calentarse la muestra va aumentando su impedancia. A pesar de los dos fenómenos la variación de impedancia que se da en esta muestra no sobrepasa las décimas de ohmio.

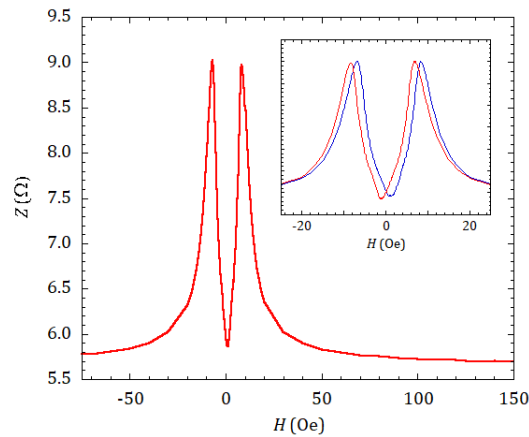


Figura 3.7: Representación de la curva  $Z$  ( $\Omega$ ) vs  $H$  (Oe) para una muestra del segundo conjunto a una frecuencia de 72 MHz. El *inset* muestra el detalle del comportamiento a bajo campo. La línea roja se ha obtenido con los valores de campo descendentes, la línea azul con los ascendentes.

Con el dispositivo del segundo conjunto, al estar la muestra de MI formada por una

### 3 Resultados

multicapa *sandwich*, se han obtenido mejores resultados (Figura 3.7). La variación de la MI llega casi a un 60 % en una frecuencia de 72 MHz y el valor máximo de la sensibilidad es de  $1.3 \Omega/\text{Oe}$  para un campo de 7 Oe. Las curvas de los valores de campo ascendentes y descendentes únicamente varían su posición horizontal a causa de la histéresis y los efectos del calentamiento de la muestra no son apreciables.

Con las medidas realizadas en estas dos muestras se ha comprobado que la estructura con la que se obtienen resultados óptimos es la multicapa *sandwich*, y por lo tanto es lo más adecuada para un sensor basado en la magneto-impedancia.

## 4 Conclusiones y futuros estudios

El objetivo de este trabajo ha sido fabricar y caracterizar unos sensores de magneto-impedancia formados por una microbobina planar y una muestra magnética. A pesar de que no se ha conseguido cumplir los objetivos del proyecto, el trabajo realizado ha sido una experiencia enriquecedora en muchos aspectos.

Se ha confirmado que es posible, con el equipo disponible en los laboratorios de la Facultad de Ciencia y Tecnología, fabricar elementos de 40, 30, 20 y hasta 10  $\mu\text{m}$  con buena resolución. Se ha visto la importancia de una correcta alineación de las etapas ya que los fallos en esta parte del proceso pueden llevar a que los dispositivos no funcionen correctamente, por ejemplo si no se consigue un buen contacto entre las dos capas que forman la microbobina. El diseño que se presenta en otros dispositivos con una configuración similar puede suponer una ventaja en este aspecto, ya que de las dos capas que forman la bobina, el área de contacto entre ambas es mayor en proporción que la del diseño aquí utilizado [14, 15].

Se ha demostrado que es posible depositar capas de óxido de silicio con propiedades aislantes aceptables en las instalaciones disponibles incluso aunque el *sputtering* no sea el mejor método de deposición, pero que estas mismas capas, al ser depositadas en los dispositivos, pierden dichas propiedades aislantes. Esto podría ocurrir a causa de los numerosos procesos a los que se someten las obleas durante la fabricación.

Se ha estudiado y confirmado la posibilidad de utilizar germanio como sustituto del óxido de silicio en función de aislante. A causa de las complicaciones que se han dado a lo largo del proyecto no ha sido posible confirmar el funcionamiento de este material como aislante en los propios dispositivos, por lo que se considera que éste podría ser un buen punto de comienzo para futuras investigaciones.

Una alternativa a estos dos materiales podría ser el *polyimide*, un material con múltiples aplicaciones entre las que se encuentran su uso como capa aislante [27, 28, 29, 30]. Otra alternativa reside en utilizar tecnología de impresión como sustitución a todo el proceso de fabricación basado en fotolitografía y deposición por *sputtering* para las bobinas y aislante.

Finalmente se ha confirmado la mayor sensibilidad que presentan las muestras de MI multicapa *sandwich* frente a las monocapa a frecuencias del orden de los megahercios. Por esta razón ese tipo de muestras son más adecuadas para su aplicación en sensores como los que se han fabricado en este proyecto.





# Bibliografía

- [1] M.-H. Phan y H.-X. Peng, «Giant magnetoimpedance materials: Fundamentals and applications», *Prog. Mater. Sci.*, vol. 53, n<sup>o</sup> 2, pp. 323-420, feb 2008.
- [2] V. E. Makhotkin, B. P. Shurikhin, V. A. Lopatin, P. Y. Marchukov y Y. K. Levin, «Magnetic field sensors based on amorphous ribbons», *Sens. Actuators Phys.*, vol. 27, n<sup>o</sup> 1-3, pp. 759-762, may 1991.
- [3] J. Vela Equiza, «Diseño y test de sistemas de acondicionamiento electrónico para sensores basados en magnetoimpedancia», Trabajo Fin de Grado, 2011. Disponible en <http://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/4146/577580.pdf?...1>, 20-jun-2017.
- [4] S. Ramo, J. R. Whinnery and T. V. Duzer: «Fields and waves in communications electronics», 3rd ed., *John Wiley and Sons*, feb 1993.
- [5] E. Fernández Martín, «Thin-film MagnetoImpedance micro-structures for sensing applications», Tesis, Universidad del País Vasco UPV-EHU, Leioa, 2013.
- [6] L. Kraus: «Theory of giant magneto-impedance in the planar conductor with uniaxial magnetic anisotropy», *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 195, num 3, pp. 764-778, jun. 1999.
- [7] J. Alkorta Salegi: «Microfabricación de láminas delgadas de MI rodeadas con una bobina planar», Trabajo Fin de Máster, BCMaterials, 2014.
- [8] David de Cos Elices, «Magnetoimpedancia de muestras planas en alta frecuencia», Tesis, Universidad del País Vasco UPV-EHU, Leioa, 2006.
- [9] «Conductividad eléctrica», Wikipedia, la enciclopedia libre. 4-abr-2017.
- [10] D. de Cos, N. Fry, I. Orue, L. V. Panina, A. Garcia-Arribas, y J. M. Barandiaran, «Very large magnetoimpedance (MI) in FeNi/Au multilayer film systems», *Sens. Actuators Phys.*, vol. 129, n<sup>o</sup> 1-2, pp. 256-259, may 2006.
- [11] L. V. Panina y K. Mohri, «Magneto-impedance effect in amorphous wires», *Appl. Phys. Lett.*, vol. 65, n.o 9, pp. 1189-1191, ago. 1994.
- [12] D. de Cos, L. V. Panina, N. Fry, I. Orue, A. Garcia-Arribas, y J. M. Barandiaran, «Magnetoimpedance in narrow NiFe/Au/NiFe multilayer film systems», *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, n.o 10, pp. 3697-3699, oct. 2005.

## Bibliografía

- [13] M. Malatek, B. Dufay, S. Saez, y C. Dolabdjian, «Improvement of the off-diagonal magnetoimpedance sensor white noise», *Sens. Actuators Phys.*, vol. 204, pp. 20-24, dic. 2013.
- [14] A. Takayama, T. Umehara, A. Yaguchi, H. Kato, «Integrated Thin Film Magneto-Impedance Sensor Head Using Plating Process», *IEEE Trans. Magn.*, vol. 35, n<sup>o</sup> 5, pp. 3643-3645, sept. 1999.
- [15] Nick Fry, Dmitry P. Makhnovskiy, Larissa V. Panina, Serghei I. Sandacci, Des J. Mapps, Muzaffar Akhter, «Off-Diagonal Magnetoimpedance in NiFe-Au-NiFe Layered Film and Its Application to Linear Magnetic Sensors», *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, n<sup>o</sup> 5, pp. 3358-3367, sept. 2004.
- [16] «Aichi Micro Intelligent Corporation, Wanowari, Arao-Machi, Tokaishi, Aichi, Japan». Disponible en <http://www.aichi-mi.com>, 20-jun-2017.
- [17] S. Sandacci, D. Makhnovskiy, L. Panina, K. Mohri, *Fellow, IEEE* y Y. Honkura, «Off-Diagonal Impedance in Amorphous Wires and Its Application to Linear Magnetic Sensors», *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, n<sup>o</sup> 6, pp. 3505-3511, nov. 2004.
- [16] J. Castañé Sánchez, «Sala blanca para procesos de deposición y litografía de materiales y nanomateriales», Proyecto de Fin de Carrera, Universitat Autònoma de Barcelona, 2009.
- [17] J. Lueke, A. Badr, E. Lou, W. Moussa, «Microfabrication and Integration of a Sol-Gel PZT Folded Spring Energy Harvester», *Sensors* 2015, 15, 12218-12241.
- [18] S. Gil, «Medición de resistencias a cuatro puntas o método de Kelvin.», 2013. Disponible en [http://www.fisicarecreativa.com/unsam\\_f3/](http://www.fisicarecreativa.com/unsam_f3/), 20-jun-2017.
- [19] M. Vázquez, M. Knobel, M. L. Sánchez, R. Valenzuela, y A. P. Zhukov, «Giant magnetoimpedance effect in soft magnetic wires for sensor applications», *Sens. Actuators Phys.*, vol. 59, n.o 1-3, pp. 20-29, abr. 1997.
- [20] G. V. Kurl'yanskaya, J. L. Muñoz, J. M. Barandiarán, A. García-Arribas, A. V. Svalov, y V. O. Vas'kovskiy, «Magnetoimpedance of sandwiched films: experimental results and numerical calculations», *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 242-245, Part 1, pp. 291-293, abr. 2002.
- [21] «Línea de transmisión», Wikipedia, la enciclopedia libre. 5-jun-2017.
- [22] K. T. Jokela, «Narrow-band stripline or microstrip filters with transmission zeros at real and imaginary frequencies», *IEEE Trans. On Microw. Theory Tech.*, vol. 28, n. 6, pp. 542-547, 1980.
- [23] «Microstrip», Wikipedia, la enciclopedia libre. 5-jun-2017.
- [24] J. Hong, «Microstrip filters for RF/microwave applications», 2nd ed, Wiley, Hoboken, 2011.

- [25] S. Mata Roca, «Transición Guía de Onda-Línea Microstrip en Banda W», Trabajo Fin de Grado, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona, 2011. Disponible en <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/13599>, 20-jun-2017.
- [26] M. A. Pérez y otros, «Instrumentación Electrónica», Ediciones Paraninfo, 2014.
- [27] F. Zhang, C. Tuck, R. Hague, Y. He, E. Saleh, Y. Li, C. Sturgess, R. Wildman, «Inkjet printing of polyimide insulators for the 3D of dielectric materials for micro-electronic applications», *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 133, n. 18, 2016.
- [28] A. Bruno Frazier, *Member, IEEE*, «Recent Applications of Polyimide to Micromachining Technology», *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 42, n. 5, pp. 442-448, 1995.
- [29] E. J. Brandon, E. Wesseling, *Associate Member, IEEE*, V. White, C. Ramsey, L. Del Castillo, U. Lieneweg, *Member, IEEE*, «Fabrication and Characterization of Microinductors for Distributed Power Converters», *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 39, n. 4, pp. 2049-2056, 2003.
- [30] W. C. Wilson, G. M. Atkinson, «Review of Polyimides Used in the Manufacturing of Micro Systems», *Technical Report*, NASA, 2007. Disponible en <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20070018345>, 20-jun-2017.