



GRADU AMAIERAKO LANA / TRABAJO de FIN de GRADO
Fisikako eta Ingeniaritza Elektronikoko Gradu Bikoitza /
/ Doble Grado en Física e Ingeniería Electrónica
(Ingeniaritza Elektronikoko Gradua / Grado en Ingeniería Electrónica)

FOTOLITOGRAFÍA SIN MÁSCARAS

Egilea / Autor:
MIKEL GARITANO TELLERIA

Zuzendaria / Directora:
MAITE GOIRIENA GOIKOETXEA

Zuzendaria / Director:
ALFREDO GARCÍA ARRIBAS

Índice general

1. Introducción y objetivos	1
2. Fabricación del dispositivo	3
2.1. La sala blanca	3
2.2. Diseño de los patrones	5
2.3. Equipo de fotolitografía <i>maskless</i>	6
2.4. Procedimiento general de fotolitografía	8
2.5. Optimización del proceso y resultados experimentales	9
2.5.1. <u>Capa N^o 1</u> : SENSOR	9
2.5.2. <u>Capa N^o 2</u> : CONTACTOS	18
2.5.3. Capa auxiliar de contactos exteriores	24
3. Mediciones de magnetorresistencia	27
4. Complicaciones	29
5. Conclusiones	30

1. Introducción y objetivos

A mediados del siglo XX, la emergente industria de la microelectrónica acarrió una enorme revolución para la tecnología y la sociedad, gracias a que subyacentes ramas de la ciencia, como la mecánica cuántica o la física del estado sólido, se encontraban lo suficientemente desarrolladas. De hecho, la invención del transistor en 1947 supuso un avance considerable para los circuitos, así como un punto de inflexión en el enfoque de los objetivos de este campo. A propósito de ello, en 1959 el físico y visionario Richard Feynman impartió una charla en Caltech [1], la cual suscitó gran interés por la *miniaturización* de los dispositivos electrónicos, aspecto que ha sido impulsado a lo largo de las décadas. Así, se han llegado a fabricar chips integrados de hasta 10^9 transistores MOS de escala nanométrica [2].

Llegados a este punto, cabe mencionar que la litografía óptica o **fotolitografía** ha jugado un gran papel en la innovación de la fabricación de semiconductores. En resumidas cuentas, este área abarca numerosas técnicas que usan radiación luminosa para reproducir patrones geométricos diminutos sobre la superficie de un sustrato (generalmente de silicio) cubierta con resina fotosensible. De esta forma, se posibilita la correcta deposición del material del dispositivo a crear. Por lo general, los sistemas de exposición utilizan una fotomáscara entre el haz de luz y el propio sustrato: una lámina de alta transparencia óptica y de superficie plana y pulida. Ésta lleva imprimidos los diseños de modo que la luz atraviese únicamente específicas zonas de interés.

Sin embargo, existen equipos innovadores que prescinden del uso de una fotomáscara física, mediante los cuales se realizan los denominados procesos de **fotolitografía *maskless***. Aunque este procedimiento no esté ampliamente destinado a fines comerciales, conviene recalcar los siguientes puntos a su favor: por un lado, el método tradicional con máscara está dirigido primordialmente a la industria, dejando casi de lado los áreas de investigación [3]. El principal escollo es el empleo de las propias máscaras, dado que imponen limitaciones en los diseños. Asimismo, con un precio del orden de los 100 euros, y estimando que un circuito integrado típico requiere el uso de alrededor de 20 máscaras, los altos costes resultan inasequibles para algunos centros de índole académica.

La tecnología *maskless*, por su parte, permite abaratar los procesos y otorgarles mayor flexibilidad. Además, en procesos de varias capas, este método resulta más versátil, puesto que ofrece la posibilidad de rediseñar y adecuar los patrones ante fallos y modificaciones inesperadas tras exposiciones anteriores.

Considerando lo mencionado previamente, el objetivo de este Trabajo de Fin de Grado, de carácter meramente experimental, es fabricar sensores de **permalloy** basados en la magnetorresistencia anisótropa (AMR) mediante un proceso de fotolitografía sin máscaras. El permalloy (Py) es una aleación magnética de 80 % Ni y 20 % Fe. Se incluirán los respectivos contactos eléctricos de **oro** (Au) mediante un segundo proceso. Si los resultados de ambas exposiciones, así como las subsiguientes etapas de deposición, resultan exitosos, se llevarán a cabo mediciones de magnetorresistencia.

Las sesiones de fotolitografía se desarrollarán en la sala blanca de la Facultad de Ciencia y Tecnología. En la parte 2.1, se explicará brevemente la organización de dicho

laboratorio, al igual que las reglas, procedimientos y condiciones que se deberán cumplir para garantizar un ambiente de trabajo limpio y seguro. Por otro lado, las deposiciones de los metales se realizarán en la sala *sputtering* adyacente. En la sección 2.3, se describirán las características generales y el funcionamiento del equipo que se utilizará en las exposiciones, enfatizando aspectos y prestaciones de especial relevancia y funcionalidad en el presente trabajo. Seguidamente, en el capítulo 2.4, se presentará el marco general del proceso, el cual se repetirá dos veces: la primera, para la creación del sensor, y la segunda, para la de los contactos. En apartados posteriores, se desarrollarán las indicaciones y especificaciones pertinentes a cada uno de los pasos, en lo concerniente al material y la instrumentación a emplear, y a las pautas a seguir.

Habiendo optimizado los procesos de fotolitografía, se procederá a la preparación y adecuación de una muestra (sección 2.5.3), con el fin de caracterizar el sensor mediante mediciones (sección 3). Finalmente, es de mencionar que se va a emplear el equipo de exposición por primera vez desde su instalación, por lo que las sesiones servirán adicionalmente tanto para determinar su utilidad en la resolución de un problema real, como para detectar problemas y complicaciones iniciales. En el apartado 4, se expondrán brevemente algunas advertencias y recomendaciones a tener en cuenta en futuros trabajos.

El sensor a fabricar presenta una variada aplicabilidad en diversos áreas y líneas de investigación, como, por ejemplo, la biomedicina, ya que pueden emplearse para la detección de bacterias magnetotácticas [4]. Éstas se orientan en el campo magnético terrestre mediante canales internos de nanopartículas magnéticas. La detección de dichas bacterias se puede llevar a cabo en el interior de un canal microfluídico fabricado sobre un sustrato de vidrio. El sensor se depositará en el fondo del canal, a una distancia que posibilite la medición del campo magnético producido por una bacteria.

Como las bacterias en cuestión poseen la capacidad de autopropulsión, resultaría especialmente innovador emplearlas como biorobots para el transporte de medicamentos dentro de un organismo. Un campo magnético externo las guiaría hacia específicas zonas de interés. Asimismo, resultaría interesante que un sensor magnetorresistivo realizara las funciones de elemento de rastreo. El material de detección debe ser de alta permeabilidad relativa, con el fin de incrementar la salida del sensor. Un material blando, como es el **permalloy**, cumple con dicho requerimiento ($\mu_r = 1000 - 90000$).

Tras la breve contextualización, se dará paso a la presentación y desarrollo de las tareas experimentales a acometer. Pero antes de nada, resulta primordial conocer y familiarizarse con el principal lugar de trabajo: la sala blanca.

2. Fabricación del dispositivo

2.1. La sala blanca

Este espacio está especialmente construido con el fin de garantizar un ambiente limpio y apropiado para la manufactura de dispositivos a escala micro y nanométrica. Se debe velar por un riguroso control de las condiciones ambientales, prestando especial atención a los siguientes factores: temperatura, humedad, flujo y filtrado de aire e iluminación. Para ello, la sala blanca cuenta con sistemas de ventilación, climatización y extracción de aire, dos deshumidificadores, filtros de aire y lámparas de luz amarilla.¹

La clase de sala se estipula de acuerdo al grado de limpieza, atendiendo al número máximo de partículas por metro cúbico (n_{\max}) de un tamaño igual o superior a $0,5 \mu\text{m}$ [5] (obsérvese la tabla 1).

Grado	n_{\max}
A	3.520
B	352.000
C	3.520.000
D	Sin definir

Tabla 1: Clasificación de salas blancas. A las instalaciones de la facultad se les ha asignado el grado D.

Siguiendo las indicaciones de la empresa fabricante de resina [6], la temperatura y humedad relativa óptimas para su manejo son las siguientes:

$$T = 21 \text{ }^\circ\text{C} ; RH = 43\% .$$

Además, la persona operaria debe cumplir con el protocolo de acceso a esta sala, llevando en todo momento la indumentaria adecuada, como puede observarse en la figura 2.1: bata, guantes, red cubre cabello y bolsas cubre calzado. Además, introducirá únicamente el material imprescindible para la realización de la sesión.

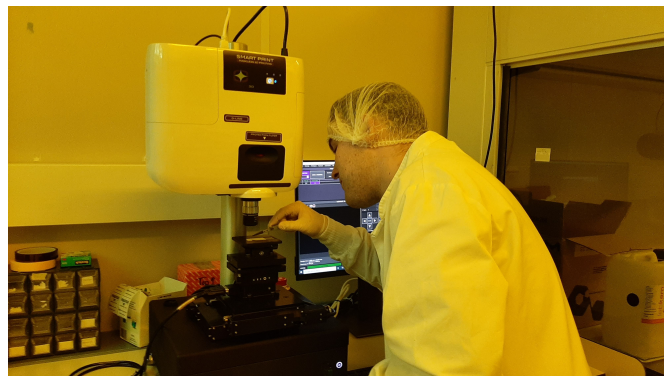


Figura 2.1: El autor en la sala blanca.

En la figura 2.2 se recogen los cuatro espacios de trabajo de esta sala:

¹La sala blanca se debe iluminar con **luz amarilla** en todo momento, puesto que la resina es sensible a la longitud de onda de la luz blanca, pudiendo ésta llegar a procesarla e inhabilitarla.

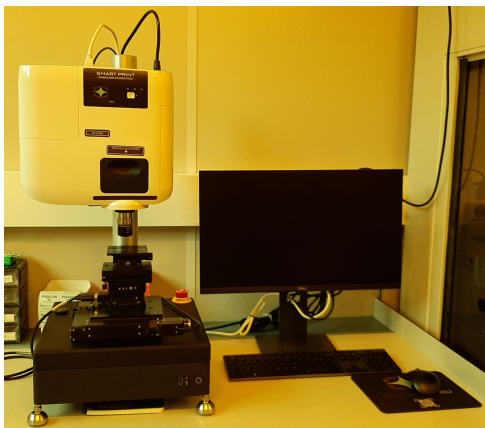
- 1 **Área de limpieza:** La zona en la que se realiza la limpieza inicial del sustrato, así como los procesos de revelado y *lift off*.
- 2 **Spinner y placas calefactoras:** Espacio en el que se deposita la capa de resina en la superficie.
- 3 **Equipo de exposición:** El sustrato se somete a la exposición de luz ultravioleta para transferir los patrones a la resina.
- 4 **Microscopio:** Se analizan y adquieren imágenes de los resultados obtenidos tras el revelado, observando la formación de los patrones en la superficie.



(a) Área de limpieza



(b) Spinner y calentador

(c) Equipo de exposición *SmartPrint*

(d) Microscopio

Figura 2.2: Áreas de trabajo de la sala blanca, en orden de empleo.

Para dar fin a esta sección, se puntualizarán aspectos de carácter general que el usuario hará de considerar:

- Para manipular el sustrato (sumergirlo, posicionarlo, etc.) se deberán utilizar pinzas.
- La superficie del sustrato se secará usando la pistola de N_2 , aplicando ráfagas continuas hasta la completa remoción de restos líquidos.
- El agua empleada en cualquier proceso que así lo requiera debe ser **desionizada**, es decir, agua de la que se han eliminado la mayoría de iones de sales y minerales. Los iones se consideran impurezas, ya que pueden dejar residuos en forma de manchas en la superficie de la muestra a tratar.

2.2. Diseño de los patrones

Los patrones se han diseñado por medio del editor *KLayout* [7]. Para comenzar, se han dibujado cinco rectángulos ($10 \times 2 \mu\text{m}$) en una primera capa, la cual se ha representado mediante líneas diagonales de pendiente ascendente (figura 2.3). Éstos forman el sensor. Los cuatro contactos rectangulares interiores ($50 \times 10 \mu\text{m}$), así como los cuadrados exteriores ($100 \times 100 \mu\text{m}$) se han añadido en una segunda capa (líneas diagonales de pendiente descendente). Obsérvese que ambas capas quedan ligeramente superpuestas ($2 \mu\text{m}$), posibilitando el contacto que permita la circulación de la corriente eléctrica entre sensor y contacto (figura 2.4). En la figura 2.5 se han incluido dos cruces en las dos capas que se denominan marcas de alineación, cuya función, como su nombre bien indica, es asistir al usuario en el crucial y estricto proceso de alineamiento.²

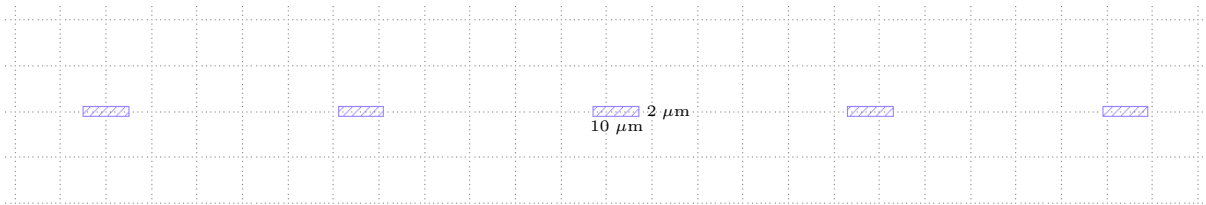


Figura 2.3: Diseño de la capa inicial.

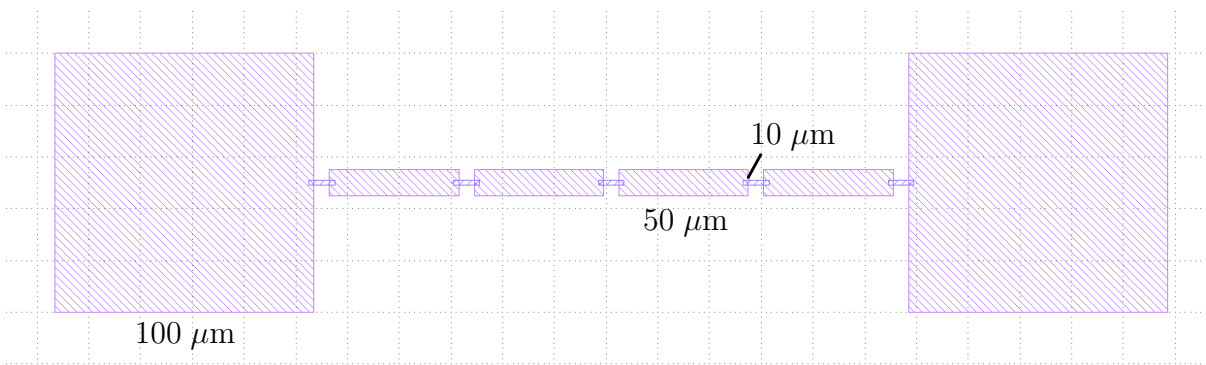


Figura 2.4: Diseño de la segunda capa.

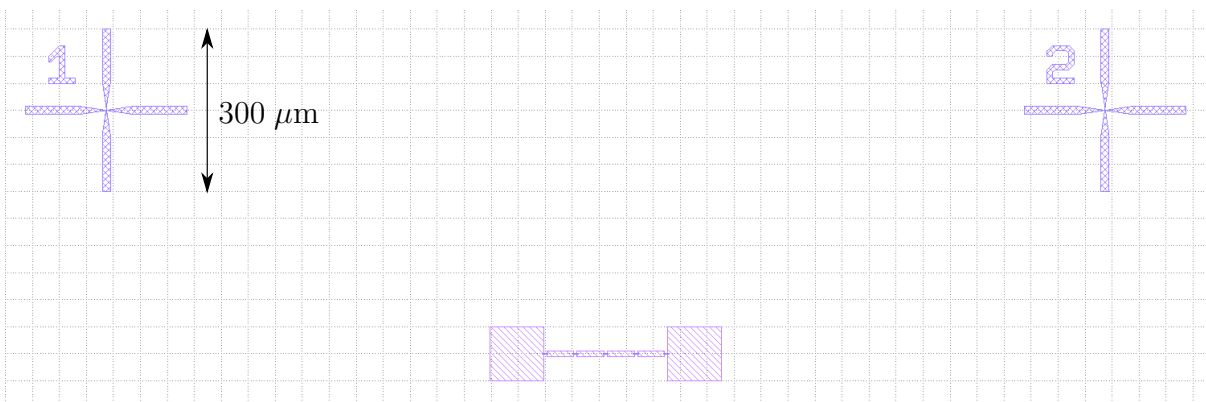


Figura 2.5: Cruces de alineación en ambas capas encima de la zona de interés.

²Se recomienda ampliar las imágenes para percibir al detalle los comentarios de esta sección.

2.3. Equipo de fotolitografía *maskless*

La tecnología de *SmartPrint* ha sido especialmente diseñada para proyectar patrones con resolución micrométrica. Las figuras 2.6 - 2.9 resumen las características principales del equipo [8].

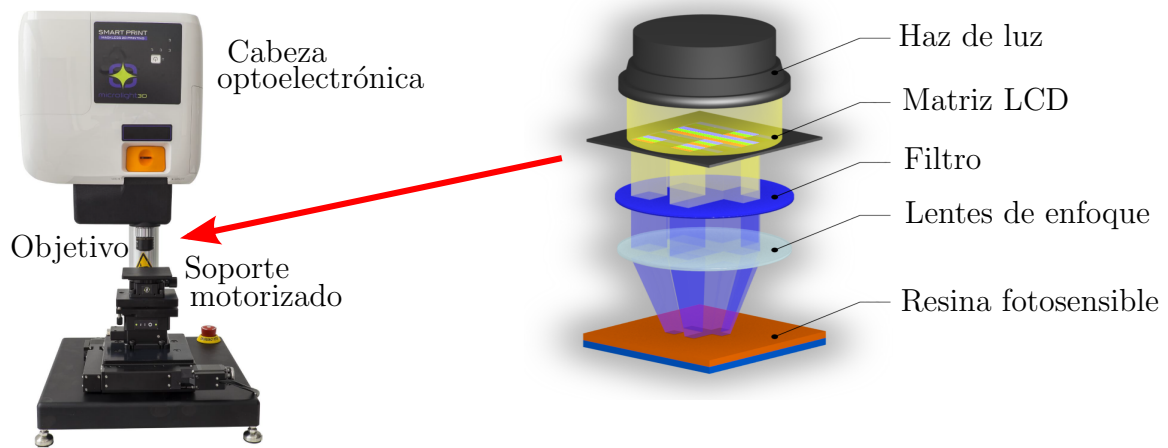


Figura 2.6: El equipo de *Smartprint* incorpora la máquina de fotolitografía *maskless* y el programa *SFTPrint*. La máscara digital es transferida a la cabeza optoelectrónica. El haz de luz atraviesa una matriz LCD, y seguidamente es filtrada y enfocada en la resina fotosensible.

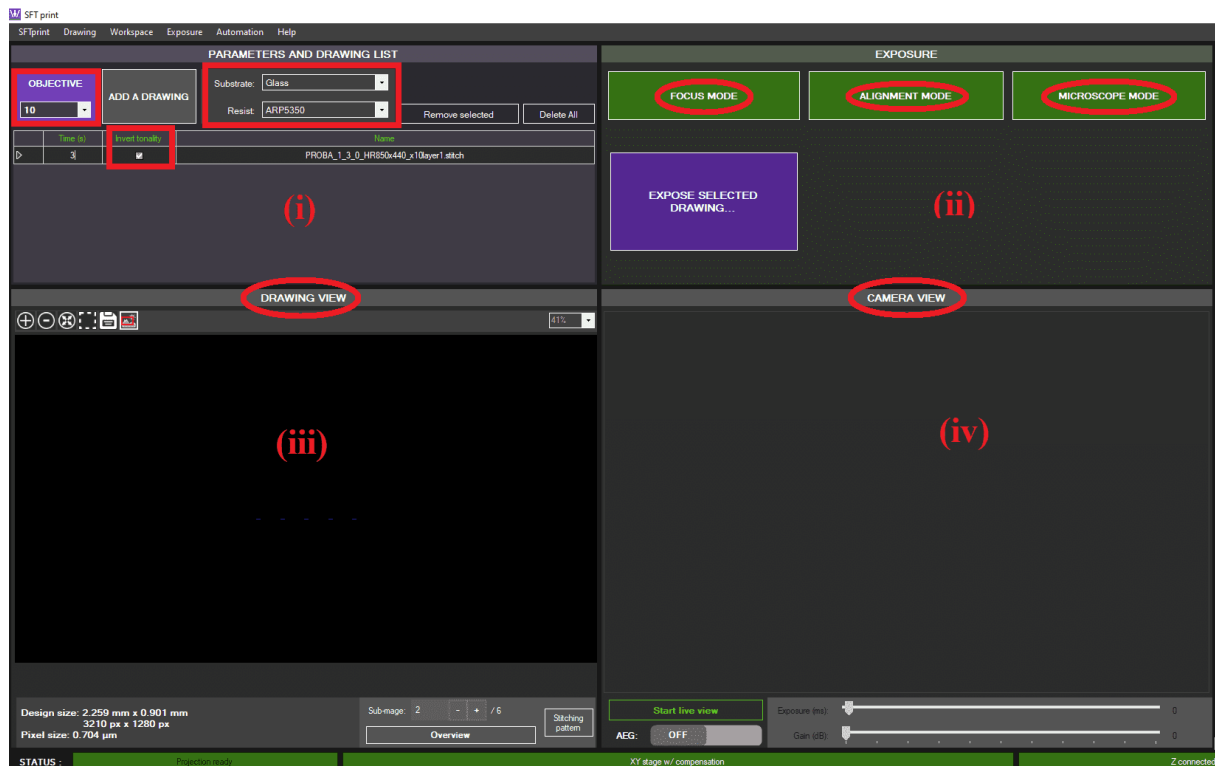


Figura 2.7: La pantalla principal del programa consiste en cuatro áreas: (i) Selección del objetivo, el sustrato, la resina fotosensible y la imagen a exponer. (ii) Control de exposición: enfoque, alineación de capas y microscopio. (iii) Pantalla visualizadora de la imagen cargada. (iv) Pantalla visualizadora de la imagen en vivo de la cámara.

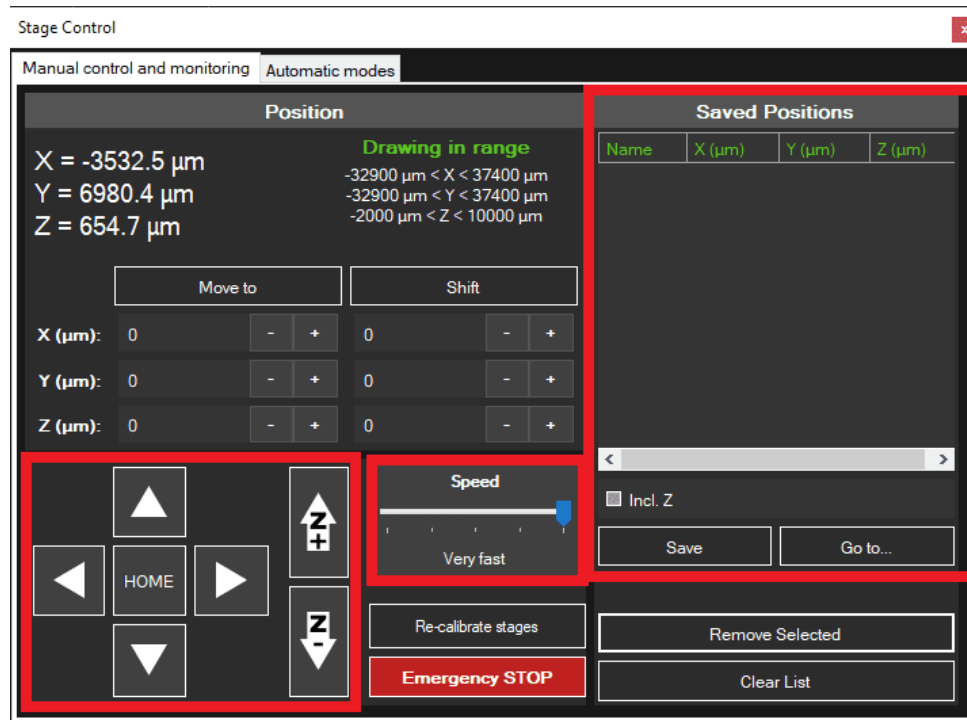


Figura 2.8: Pantalla auxiliar de control del soporte del sustrato. Éste puede desplazarse en las direcciones x , y y z por medio de las flechas, a cinco velocidades diferentes. También es posible guardar las coordenadas de los puntos de interés. Esto último resulta especialmente interesante a la hora de ajustar el enfoque.

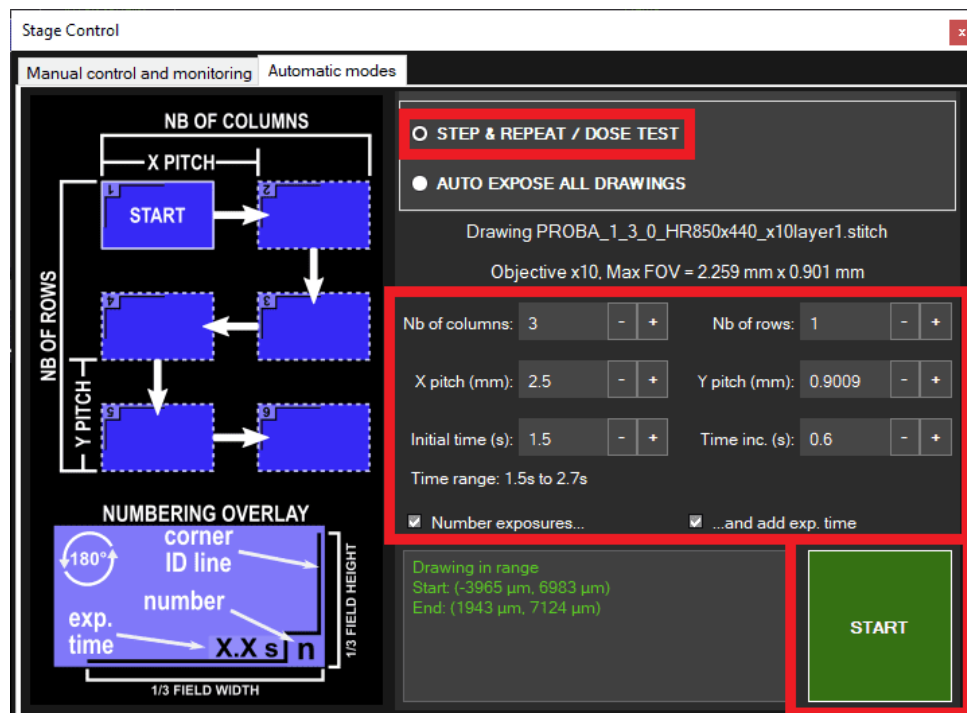


Figura 2.9: La segunda pantalla auxiliar permite efectuar varias exposiciones, tanto en horizontal como en vertical, pudiendo variar la dosis de tiempo entre ellas. Adicionalmente, es posible incluir un marco exterior especificando el tiempo de cada exposición, para un mejor seguimiento y control.

2.4. Procedimiento general de fotolitografía

En la figura 2.10 se muestra el esquema de los cinco pasos fundamentales del proceso de fotolitografía.

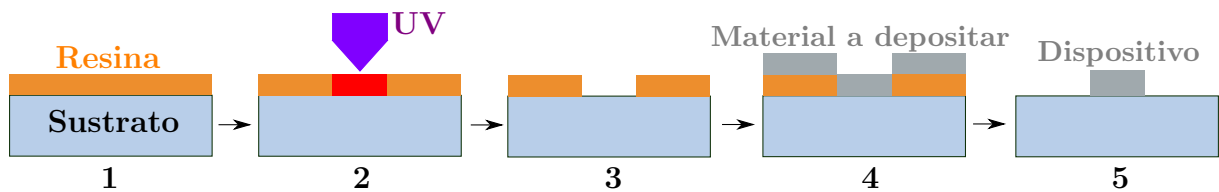


Figura 2.10: Resumen esquematizado del proceso de fotolitografía.

- 1 DEPOSICIÓN DE RESINA:** El sustrato limpio se cubre con una capa inicial de promotor de adherencia y la subsiguiente capa de resina fotosensible, mediante dos programas de centrifugado. Acto seguido, se somete a un *soft bake* o recocido.
- 2 EXPOSICIÓN:** El sustrato se coloca en el soporte de la máquina *maskless*, para así realizar varias exposiciones. La luz UV graba los patrones transferidos al equipo en la resina. Como ésta es **positiva**, la reacción fotoquímica que ocurre en específicas zonas al ser incididas por la luz ultravioleta debilita los polímeros [9]. Previo a la segunda exposición, es imprescindible garantizar el correcto alineamiento de ambas capas.
- 3 REVELADO:** El sustrato se sumerge en una solución de revelado. El revelador disolverá y eliminará la zona de la resina correspondiente a los patrones del dispositivo y a las cruces de alineación. Los patrones del diseño se vuelven visibles en la superficie.
- 4 DEPOSICIÓN:** Un proceso de *sputtering* realiza la deposición del material, creando una fina película sobre la superficie. Para más detalles, ver la figura 2.20.
- 5 LIFT OFF:** El sustrato se sumerge en acetona, la cual elimina la capa de resina, sin alterar el metal depositado directamente sobre la superficie. Así, se crea finalmente el dispositivo deseado.

2.5. Optimización del proceso y resultados experimentales

2.5.1. Capa N° 1: SENSOR

En esta sección, se explicará el primer proceso de fotolitografía, mediante la cual se reproducirán los patrones de la figura 2.3 en un sustrato de vidrio, también denominado porta (figura 2.11).

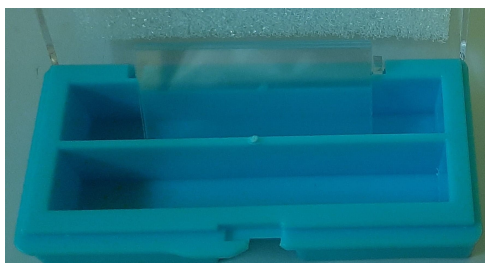


Figura 2.11: Caja de sustratos. Dimensiones: (24 × 40 × 0,15) mm.

Limpieza del sustrato

Primeramente, el sustrato se debe limpiar, para eliminar posibles contaminantes y agentes orgánicos. De esta forma, se propiciará la adhesión de la resina. Para comenzar, el sustrato será sometido a un **baño de acetona** que eliminará contaminantes orgánicos. Se debe verter la suficiente cantidad al recipiente correspondiente, de tal manera que el vidrio quede completamente sumergido. El recipiente se colocará en la máquina de ultrasonidos³ (Figura 2.12), y se mantendrá ahí durante 2 minutos. Una vez que haya transcurrido ese tiempo, el sustrato se sacará del envase, sosteniéndolo cuidadosamente con las pinzas por un extremo. Con la pistola de nitrógeno se aplicarán ráfagas discontinuas con una pequeña inclinación respecto a su plano paralelo, para así eliminar los restos de acetona. Las pinzas también deben quedar limpias.



Figura 2.12: El recipiente de acetona con el sustrato en el baño de ultrasonidos.

³Esta máquina contiene un generador de ondas de sonido de altas frecuencias. La diferencia entre las presiones de los máximos y mínimos de estas ondas de compresión produce burbujas en el líquido, las cuales fomentan la remoción de contaminantes y partículas [10].

Después, se procederá al **baño de isopropanol** para eliminar los residuos de acetona, en el cual se deberán seguir los pasos explicados en el párrafo anterior.

Spin coating: deposición de resina

Al finalizar la limpieza, el sustrato se colocará bien centrado en la centrifugadora, también denominada *spinner*, donde quedará sujeta mediante vacío (Figura 2.13). Primero, se cubrirá gran parte de su superficie ($\approx 80\%$) con un **promotor de adherencia** que consiste en una solución de HMDS (*hexametildisilazano*) [11], el cual fortalecerá la resistencia de la adhesión de la resina al vidrio. Por otro lado, cabe mencionar que una humedad muy elevada ($> 60\%$) puede debilitar la adhesión considerablemente.



Figura 2.13: El vidrio queda sujeto al soporte del *spinner* mediante vacío. También recibe un flujo de aire comprimido (N_2) para reducir la humedad. Éstos son esenciales para la inicialización y el desarrollo completo de los programas de centrifugado.

El usuario cerrará la cubierta y se asegurará de que el vacío se está realizando adecuadamente (la pantalla no debe parpadear). Después, seleccionará el programa E, por lo que el sustrato girará a 4000 rpm durante 30 s. Es importante percatarse de que dicho programa consiste de siete fases en total: tres de aceleración, la principal y tres de deceleración. Es decir, la velocidad aumenta y decrece progresivamente (figura 2.14). Así, se creará una capa de aproximadamente 15 nm de espesor. Cuando el HMDS se haya distribuido uniformemente, se depositará la **resina fotosensible** (con otra pipeta). El *photoresist* que se emplea es positivo [12]. Es conveniente almacenar el bote seguidamente tras su uso, para así evitar el deterioro de la resina debido a la humedad y otros factores. En este caso se seleccionará programa S, el cual hará girar al sustrato a 4000 rpm durante 60 s, adquiriendo de esta forma un espesor de 1 μm , según la hoja de especificaciones.

La resina debe quedar bien adherida, uniformemente distribuida y sin defectos ni restos de disolventes. Para ello, el sustrato se someterá a un **recocido** o *soft bake* en la placa calefactora, en concreto a 105 °C durante 4 minutos. En este paso el control del tiempo y la temperatura son cruciales, y no deben ser rebasados, dado que esto podría alterar las propiedades de la resina, lo cual afectaría significativamente los resultados de los procesos ulteriores. Tras el *soft bake*, se dejará reposar y enfriar al vidrio durante unos minutos (a temperatura ambiente).

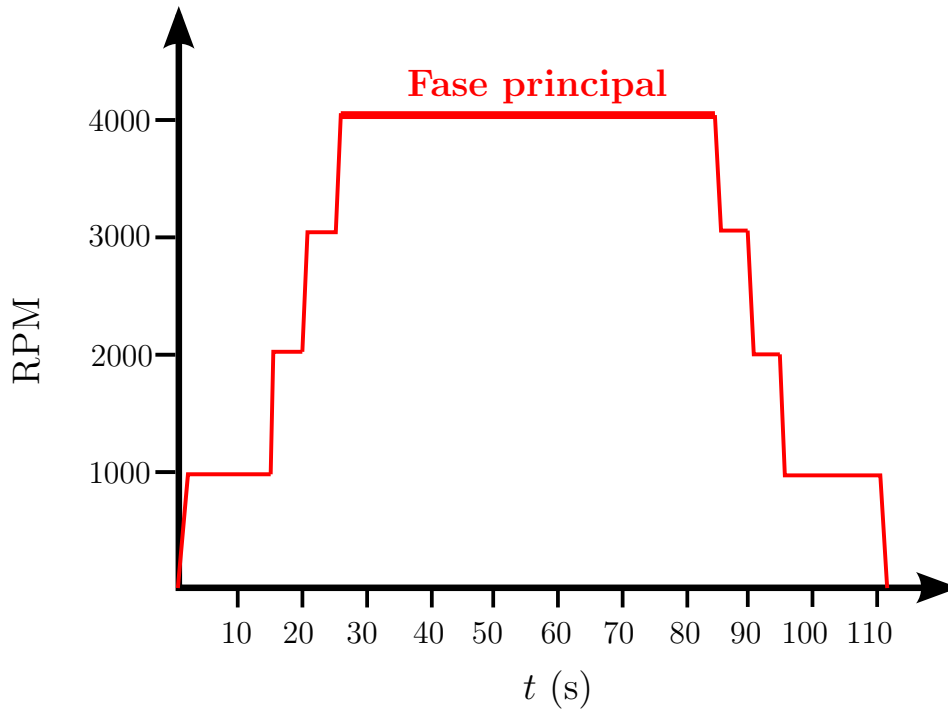


Figura 2.14: Fases de aceleración, principal y deceleración del programa *S* del *spinner*, empleado en la deposición de la resina.

Exposición nº 1

A continuación, el sustrato se posicionará en el soporte de la máquina. Se debe procurar que los bordes queden bien alineados (figura 2.15). Hecho esto, los pasos subsiguientes se llevarán a cabo mediante el programa *SFTPrint*. La máscara del sensor se transferirá siguiendo el formato de *stitching* (figura 2.16), con el objeto de aumentar la resolución. En la pantalla principal (sección (i) de la figura 2.7) se seleccionará el objetivo de mayor aumento ($\times 10$) y sustrato de vidrio. Cabe destacar que las dimensiones del sensor a fabricar se encuentran en el límite de la resolución de la cámara ($2 \mu\text{m}$).

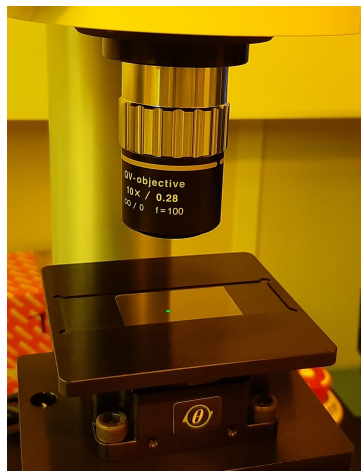


Figura 2.15: El sustrato en el soporte, debajo del objetivo.

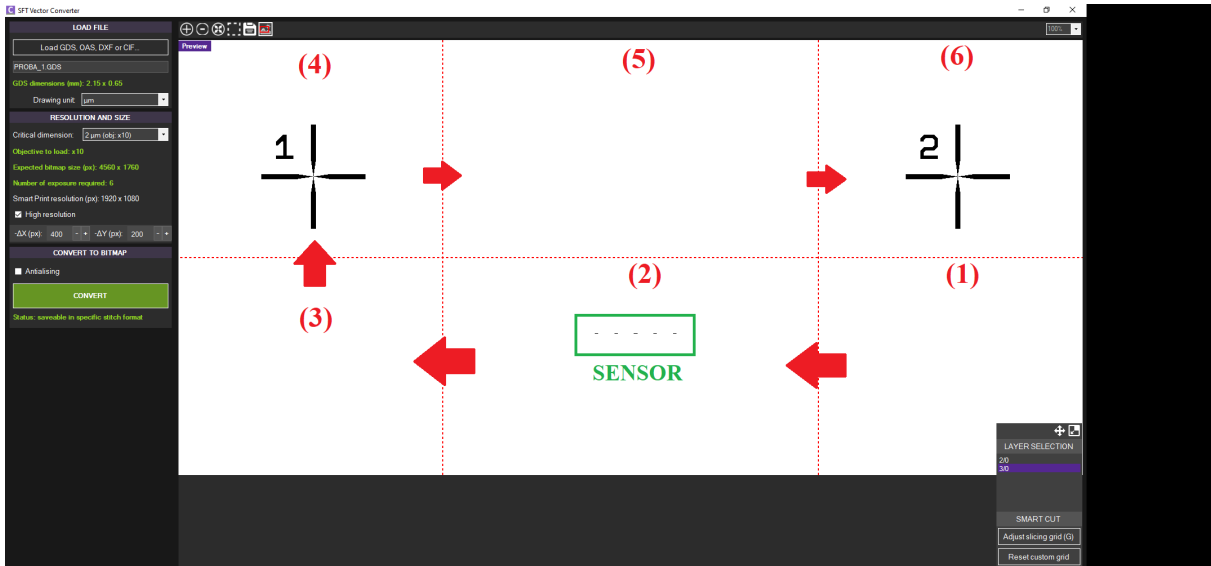


Figura 2.16: *Stitching Mode* de la primera capa. El diseño del sensor se repartirá en seis celdas. De esta forma, la exposición se realizará en seis pasos, siguiendo las flechas rojas.

Tras finalizar la configuración inicial, se procederá a la selección de la zona de interés (figura 2.17). Ésta no ha de quedar muy cerca de los bordes, dado que existiría el riesgo de dañar los diseños al sujetar el vidrio con las pinzas. Como se va a llevar a cabo un test de dosis, se realizarán varias exposiciones, una tras otra. Por ello, el área escogida deberá ser lo suficientemente extensa. Después, se corregirá el **enfoque**. Este paso es vital, pues de ello depende en gran medida que la imagen sea transferida nítidamente al sustrato. Además, como se ha mencionado previamente, las dimensiones del borde corto de cada componente del sensor coinciden con el límite de la resolución de la cámara de la máquina. Por ende, se deberá prestar especial atención a este paso. Al pulsar en *FOCUS MODE* (sección (ii) de la figura 2.7), en la pantalla de la cámara aparecerá una red con letras y números. Se guardarán las coordenadas del punto P_1 , y en él se ajustará la posición del eje z , haciendo mover verticalmente el motor del soporte mediante las flechas. Seguidamente, moviendo el soporte en horizontal, se fijará el punto P_2 , ajustando en él el eje x manualmente. Este proceso se repetirá varias veces, hasta asegurarse de que el enfoque es correcto en la totalidad de la zona (figura 2.18b).

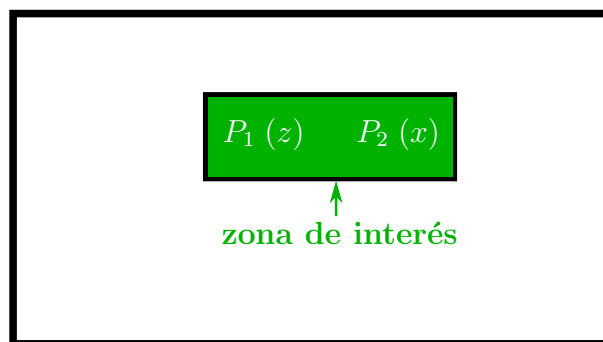


Figura 2.17: Puntos de enfoque en el sustrato.

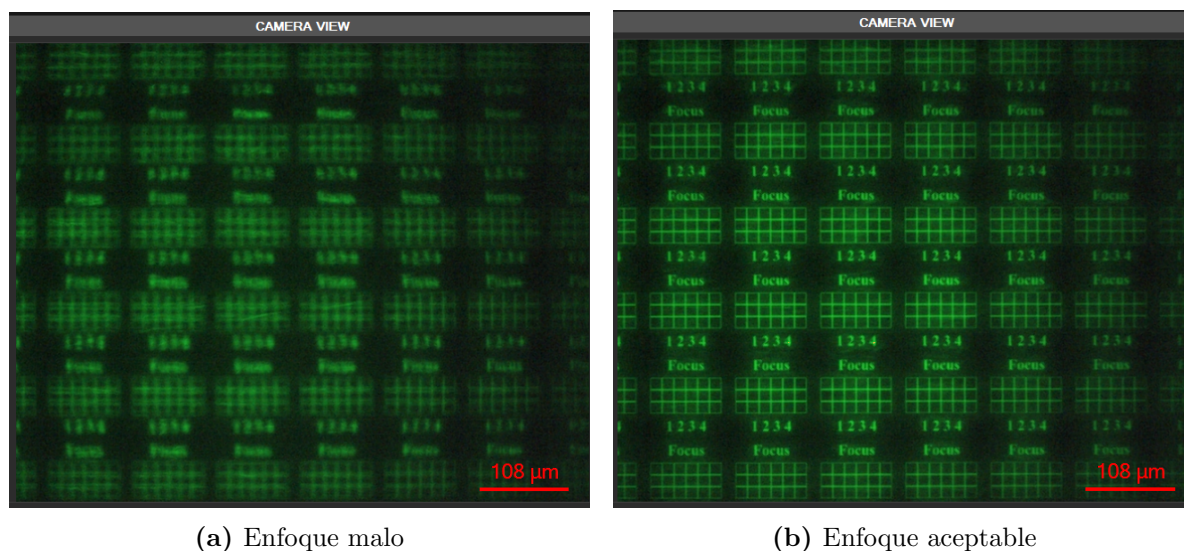


Figura 2.18: Red de enfoque a vista de cámara.

Una vez arreglado el enfoque, se procederá a la propia exposición. Mediante la opción *dose test*, se **determinará la dosis** adecuada; es decir, el tiempo óptimo de exposición para garantizar la correcta transferencia de los patrones a la resina. Para ello, se fijará el soporte en el punto P_1 , y se especificarán los siguientes puntos (ver figura 2.9):

- **Número de columnas:** 3 ; **Número de filas:** 1
- $\Delta x = 2,5 \text{ mm} \rightarrow$ **Distancia en horizontal entre exposiciones**
- **Tiempo inicial:** 1,5 s ; **Aumento de tiempo:** 0,6 s

Observando las especificaciones introducidas, se efectuarán tres exposiciones en horizontal. Como la imagen entera de la figura 2.5 ocupa una longitud de 2,1 mm, se dejará un espacio de 2,5 mm entre exposiciones. Los tiempos de exposición serán los siguientes:⁴

$$1,5 \text{ s} \rightarrow 2,1 \text{ s} \rightarrow 2,7 \text{ s} .$$

Antes de comenzar, el usuario deberá colocarse las gafas protectoras, y no deberá quitárselas hasta la culminación del proceso. Además, deberá retirar el filtro protector de luz azul de la máquina. Mientras dura la exposición, observará los resultados a vista de cámara en la pantalla del programa. Al finalizar, volverá a colocar el filtro.

Revelado y observación de los resultados

Se procederá al último paso en la sala blanca. En el recipiente correspondiente, se preparará la solución de revelado, mediante el revelador AR 300-35 [13] y agua desionizada, siguiendo la proporción 2:1; es decir, dos partes de agua (50 ml) por cada una de revelador (25 ml). El sustrato se mantendrá sumergido durante 90 s. Se le aplicarán movimientos transversales, con el objeto de propiciar la penetración del revelador en la resina. Al transcurrir el periodo de tiempo, el sustrato se meterá en agua para detener la reacción.

⁴Los datos corresponden a la sesión del 28 de febrero de 2022. En sesiones posteriores se han requerido mayores tiempos de exposición para obtener resultados deseables. Ver sección 4.

Después, se verterá agua en abundancia en la superficie incidida, para así eliminar el revelador residual. Tras eliminar los restos con N_2 , se observarán los resultados por medio del microscopio de la alineadora (figura 2.19).

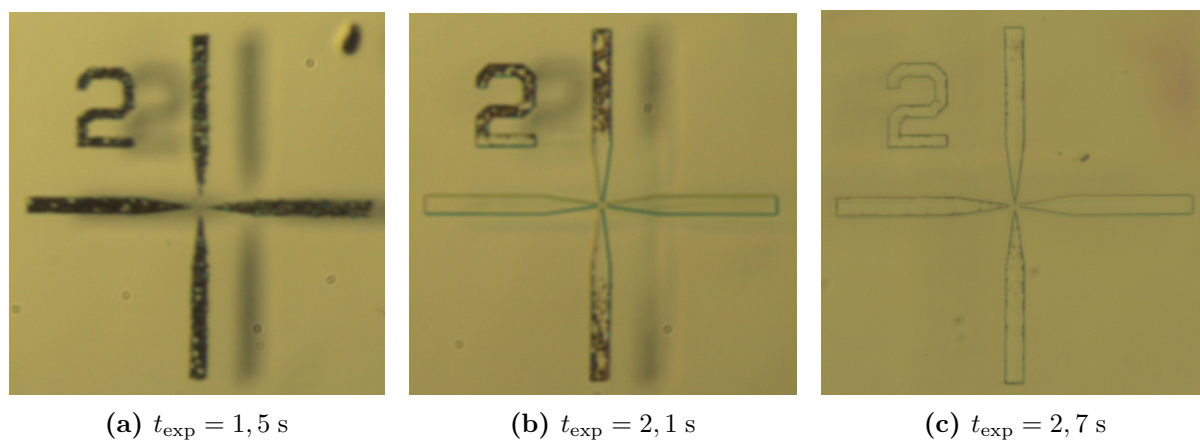


Figura 2.19: Cruz nº 2 de alineación tras la primera exposición.

En figura 2.19a se puede apreciar claramente que la resina expuesta por la luz ultravioleta no ha sido adecuadamente disuelta y extraída por el revelador, puesto que su interior muestra una tonalidad muy oscura, la cual va disminuyendo en las figuras adyacentes. Esto no es aceptable, pues impediría la correcta deposición del material. Solamente deben quedar marcados los bordes de los patrones. El fenómeno mencionado se puede deber a varios factores:

- Un recocido insuficiente. Este factor se descarta, puesto que otras cruces del mismo sustrato han salido claramente definidas.
- Tiempo insuficiente de revelado. En otros sustratos con $t_{\text{rev}} = 30 \text{ s}$ y 60 s , la resina no ha sido debidamente disuelta. Se ha concluido que el tiempo adecuado es de 90 s .
- Tiempo insuficiente de exposición. En este caso, éste es el factor causante. El tiempo de revelado es el adecuado: 90 s . Además, se puede observar claramente que, a medida que t_{exp} aumenta, la tonalidad oscura disminuye considerablemente.

Teniendo en cuenta que el único resultado permisible es el de la figura 2.19c, se concluye que las **dosis adecuadas de exposición** y de **revelado** para la **primera fotolitografía** son las siguientes⁵:

$$t_{\text{exp}} = 2,7 \text{ s} ; t_{\text{rev}} = 90 \text{ s} .$$

En sesiones subsiguientes, se prepararon dos muestras con la dosis adecuada para así proceder a la deposición del permalloy.

⁵No se han incluido imágenes correspondientes a los patrones del sensor tras el revelado, debido a su reducido tamaño. La cámara de la alineadora de la sala blanca (figura 2.2d) no permite tomar fotos con la suficiente resolución y calidad.

Sputtering Py y Lift off

La técnica denominada *sputtering* es ampliamente empleada para la creación de películas delgadas [14, 15].

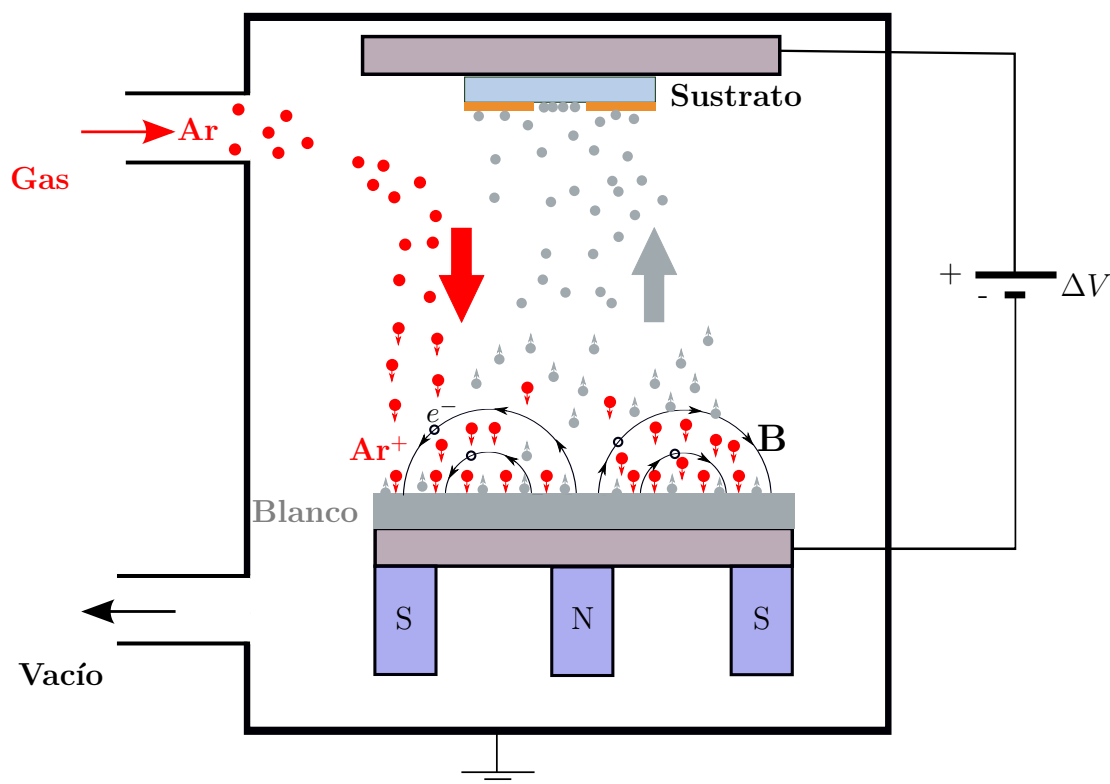


Figura 2.20: Proceso esquematizado del *sputtering* magnetrón. Los iones de argón impactan contra el blanco de permalloy, extrayendo átomos y creando así una fina capa en el sustrato. El campo magnético aplicado confina los iones a la región del blanco, lo cual incrementa el número de colisiones, reduciendo el tiempo de deposición.

Flujo _{Ar} (sccm)	p_{Ar} (μ bar)	P (W)	ΔV (V)	I (A)	Esp. (nm)	t_{pre} (min)	t_{sp} (min)
11	2,8	110	396	0,27	100	3	6

Tabla 2: Parámetros de *sputtering* de permalloy.

El esquema del proceso de deposición ha sido representado en la figura 2.20. En la tabla 2 se han recogido los siguientes valores: flujo y presión del argón (Flujo_{Ar} y p_{Ar}), potencia (P), diferencia de potencial (ΔV), corriente (I), espesor de la capa (Esp.), tiempo de *pre sputtering* (t_{pre}) y tiempo de *sputtering* (t_{sp}).

El sustrato se colocará en un soporte especial, el cual permitirá definir la imanación del sensor en el sentido perpendicular al eje largo (figuras 2.22 y 3.2), aplicando un campo magnético de 250 Oe. De esta forma, se propiciará la detección del cambio de la magnetorresistencia (sección 3). Seguidamente, se introducirá en el lugar correspondiente de la cámara (figura 2.21).

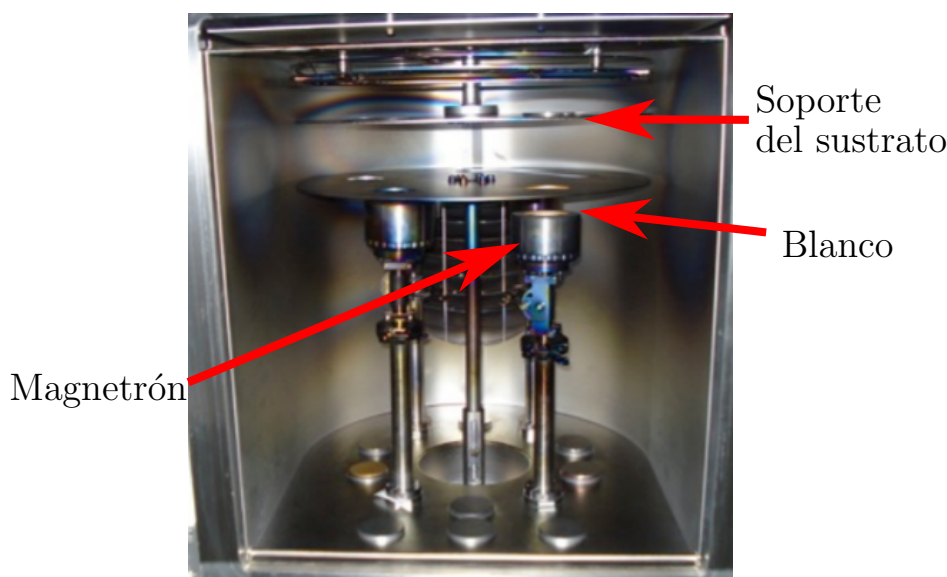


Figura 2.21: Interior de la cámara.

En primer lugar, se debe generar vacío en el interior de la cámara por medio de dos bombas. La bomba auxiliar rotatoria servirá como apoyo inicial para la bomba turbo molecular, la cual, más lentamente, logrará llegar hasta $1,6 \times 10^{-6}$ mbar (alto vacío).

A continuación, se deberá suministrar gas de argón⁶ (*sputtering gas*) a una presión de $2,8 \times 10^{-3}$ mbar, y se establecerá una potencia de 110 W mediante una fuente de corriente continua para generar el plasma dentro del campo magnético creado por los magnetrones ($\approx 0,3$ T). Este campo confinará los electrones presentes en el gas de argón cerca del blanco de permalloy. La diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo acelerará dichos electrones, y éstos colisionarán con los átomos de argón más próximos. La repulsión electrostática causará la ionización de estos últimos. De esta forma, los iones de argón (Ar^+) serán acelerados e impactarán con gran energía contra la superficie de permalloy, cuyos átomos serán extraídos y adquirirán la suficiente energía cinética para poder alcanzar el sustrato y difundirse en su superficie para hallar la posición de energía mínima, en donde quedarán depositados. Esto favorece la adhesión de la película, y también aumenta su densidad, reduciendo así los defectos.

Llegados a este punto, cabe mencionar que primeramente se debe realizar una **deposición previa** (*pre-sputter*). Este paso es crucial, puesto que la muestra de permalloy contiene una capa inicial de óxido por el efecto de la atmósfera del ambiente, y, si se depositara directamente en el sustrato, ésta se contaminaría de impurezas. El tiempo de *pre-sputter* ha sido de 3 minutos. A continuación, se dará paso al propio *sputtering*, el cual requerirá alrededor de 6 minutos para conseguir la capa de permalloy de 100 nm deseada. En la figura 2.22 se puede observar la película de permalloy en la superficie. Como se ha comprobado después, el material depositado ha sido de mala calidad, lo cual ha repercutido en los resultados de las medidas (sección 3).

⁶Es típico escoger un gas de *sputtering* de alto peso molecular para incrementar el número de colisiones. Esto, a la vez, aumenta la tasa de deposición y, por tanto, acorta el proceso.



Figura 2.22: El sustrato en el soporte especial. La cruz roja define la dirección de imanación.

Tras la finalización del proceso de deposición, se llevará a cabo el *lift off* de la capa de permalloy y la eliminación de la resina bajo ella. El vidrio se sumergirá en acetona dentro de un vaso de precipitado cubierto con *parafilm* (para evitar la evaporación de la acetona), durante 30 minutos. La capa de resina debe quedar completamente retirada. Un baño en ultrasonidos puede resultar útil para este efecto. Acto seguido, se someterá a un baño en isopropanol de 2 minutos. Finalmente, se secarán los restos con la pistola de nitrógeno. De esta manera, el permalloy habrá quedado depositado únicamente en los patrones correspondientes al sensor y a las cruces. Acto seguido, se analizarán los resultados.

Resultados tras deposición de permalloy

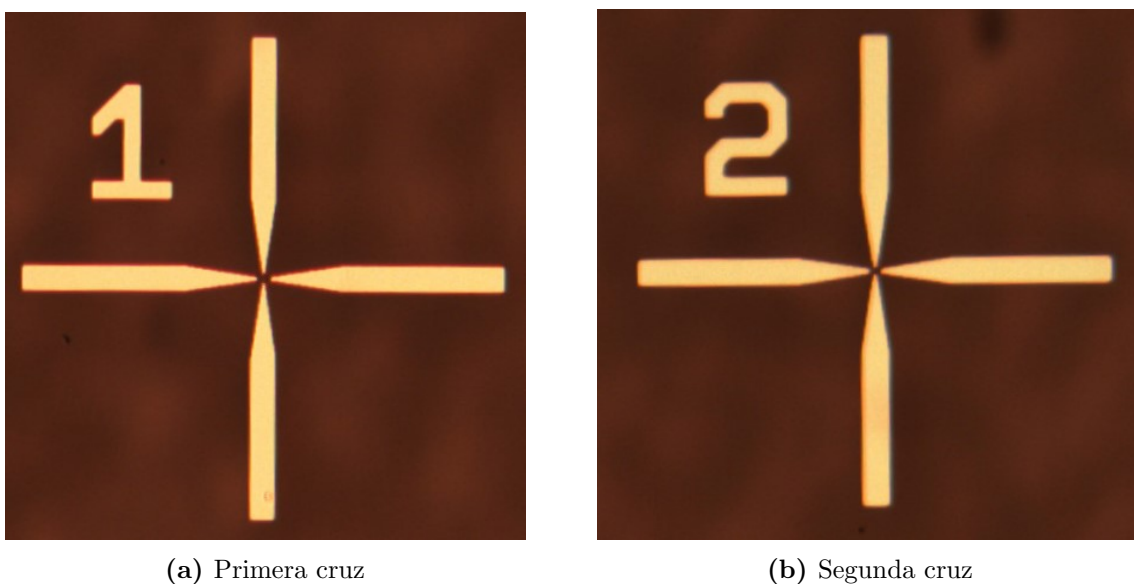
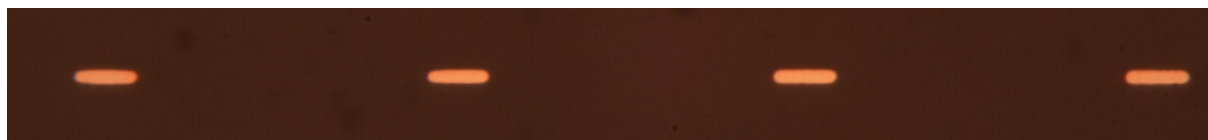


Figura 2.23: Las cruces de alineamiento tras la deposición de Py (objetivo $\times 20$).

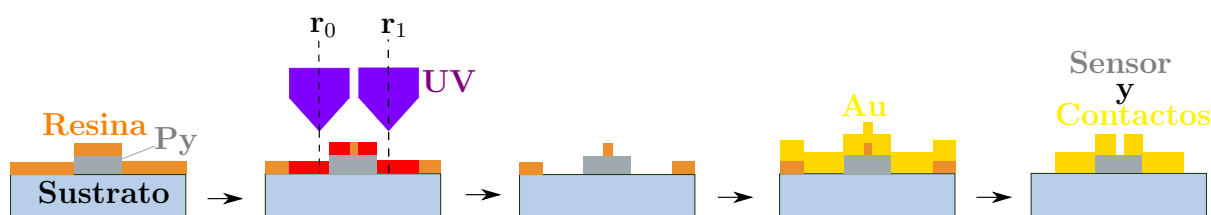
(a) Objetivo $\times 20$.(b) Objetivo $\times 50$.**Figura 2.24:** El sensor tras la deposición. Dimensiones de los elementos del sensor: $(10 \times 2) \mu\text{m}$.

Las imágenes 2.23 - 2.24 han sido adquiridas mediante el microscopio del laboratorio de materiales. El contorno de las cruces parece haber salido correctamente. Éstas van a ser determinantes para garantizar la correcta alineación entre sensores y contactos. Por otro lado, mediante este microscopio de mayor resolución también se han tomado imágenes de mayor calidad del sensor de permalloy. En este caso, los bordes no se han definido claramente, lo cual deja en evidencia el límite de la resolución del equipo de fotolitografía. Pese a ello, los elementos constituyentes del sensor se observan bien alineados y espaciados, y el material se ha depositado adecuadamente en su interior. Por consiguiente, podrán desarrollar su función debidamente.

2.5.2. Capa N^o 2: CONTACTOS

Se repetirán los procesos de limpieza y recubrimiento explicados en la sección anterior. Sin embargo, se deberán tomar en consideración dos particularidades: por un lado, con el fin de evitar el deterioro de las estructuras pertenecientes al sensor, se reducirá el tiempo del baño de ultrasonidos a aproximadamente 20 segundos. Por otro, debido a la simetría del vidrio, existe el riesgo de confundir ambas superficies, luego es recomendable dibujar una muesca con punta de diamante en una esquina como marca de identificación.

Alignment mode: alineación de capas

**Figura 2.25:** Se fijarán las posiciones r_0 y r_1 en cada uno de los elementos del sensor mediante la correcta alineación de las cruces de la figura 2.5. Así, posteriormente se depositará el material de los contactos en el área adecuada.

La figura 2.25 esquematiza el proceso de creación de los contactos. Antes de nada, se transferirá la máscara perteneciente a los contactos al programa de la máquina.

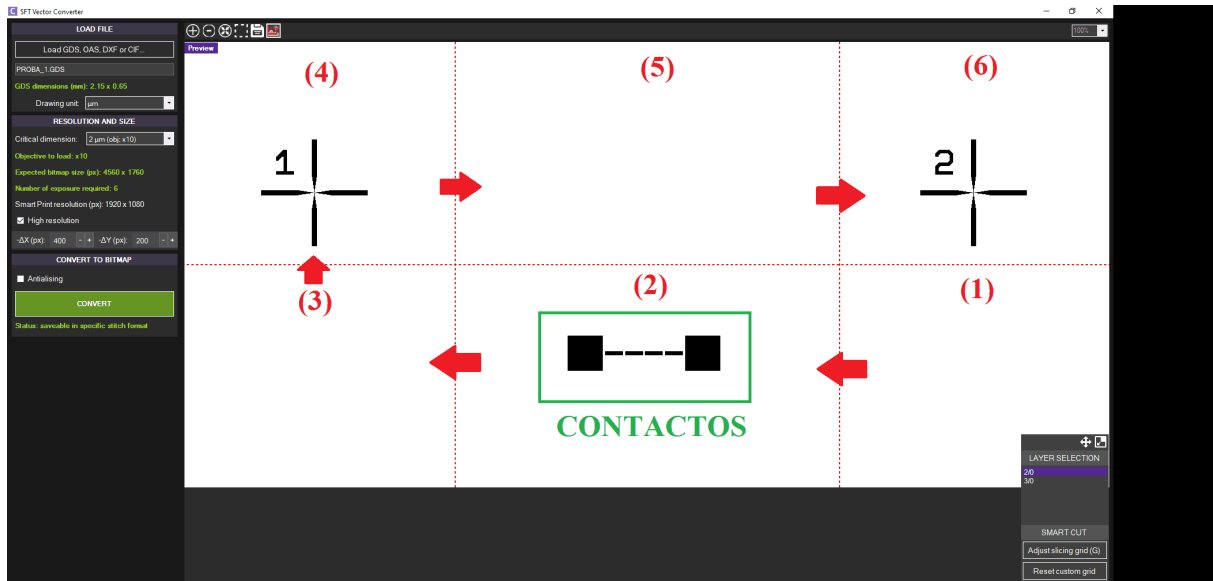


Figura 2.26: *Stitching mode* de la segunda capa. Ver las explicaciones de la figura 2.16.

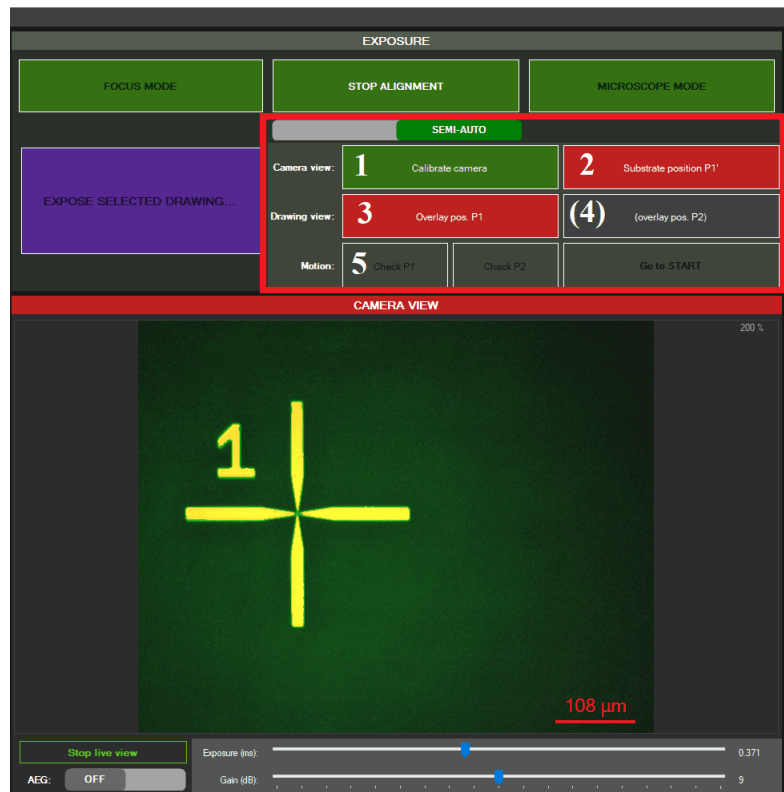


Figura 2.27: Pasos del *Semi-automatic alignment mode*: **1.** Calibrar la cámara ; **2.** Escoger el punto del sustrato a vista de cámara (P_1' : centro de la cruz 1) ; **3.** Escoger el punto a alinear con P_1' a vista del dibujo (P_1 : centro de la cruz 1 de la segunda capa). ; **4.** (Paso opcional) Escoger otro punto del dibujo (P_2 : centro de la cruz 2 del dibujo) ; **5.** Verificar el alineamiento.

A continuación, se procederá al **alineamiento entre capas**. Primeramente, se acti-

vará el microscopio de la máquina (*Microscope Mode*). Así, haciendo mover el soporte, se hallarán las cruces de la exposición número 1 con el permalloy depositado para comenzar con el alineamiento. En la figura 2.27 se explica el proceso del alineamiento en modo semi-automático. Este paso requiere gran minuciosidad debido a las limitaciones de la cámara de la máquina. Al aumentar la imagen, ésta pierde calidad, por lo que resulta complicado acertar en el centro de las cruces de alineación. Además, la distancia de superposición entre sensor y contacto es de tan solo $2\ \mu\text{m}$, por lo que un ínfimo desvío acarrearía un alineamiento inadecuado, tanto en horizontal como en vertical (obsérvese con detenimiento la figura 2.30).

Habiendo configurado el alineamiento, se realizará la **exposición de la segunda capa**. Se deberán seguir los pasos de la sección anterior para ajustar la dosis de exposición de los contactos.

- **Número de columnas:** 3 ; **Número de filas:** 1
- $\Delta x = 2,5\ \text{mm}$ → **Distancia en horizontal entre exposiciones**
- **Tiempo inicial:** 1 s ; **Aumento de tiempo:** 0,4 s

Así, los tiempos de exposición serán los siguientes⁷:

$$1\ \text{s} \rightarrow 1,4\ \text{s} \rightarrow 1,8\ \text{s} .$$

Tras la exposición, se dará paso al **revelado** y al análisis de los resultados.

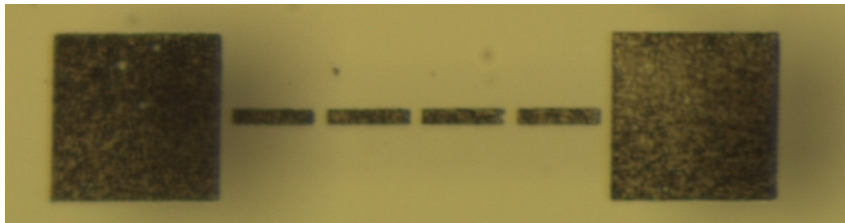


Figura 2.28: $t_{\text{exp}} = 1,1\ \text{s}$ y $t_{\text{rev}} = 60\ \text{s}$. El grado de revelado es muy bajo. El sensor no fue correctamente depositado previamente.

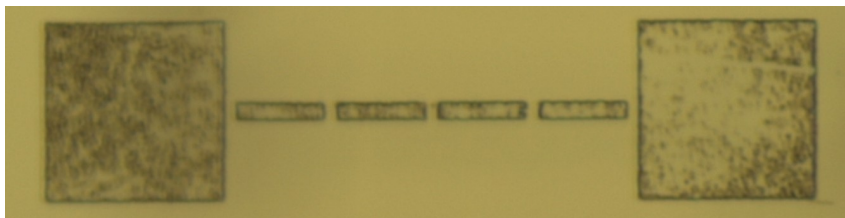


Figura 2.29: $t_{\text{exp}} = 1,4\ \text{s}$; $t_{\text{rev}} = 60\ \text{s}$. El resultado ha mejorado. No se aprecia el sensor.

⁷En exposiciones posteriores se ha variado ligeramente la dosis del tiempo. Por otro lado, al hilo de lo mencionado previamente, en sesiones posteriores se requerirán dosis mayores.

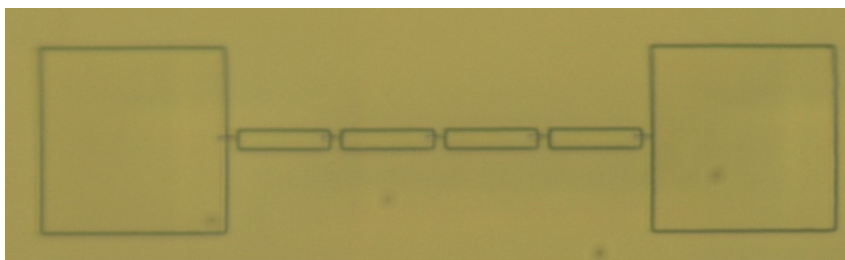


Figura 2.30: $t_{\text{exp}} = 1,8 \text{ s}$; $t_{\text{rev}} = 60 \text{ s}$. Contactos limpios con bordes bien definidos. La alineación entre sensor y contactos no es aceptable, pues apenas se aprecia contacto entre ambos elementos.

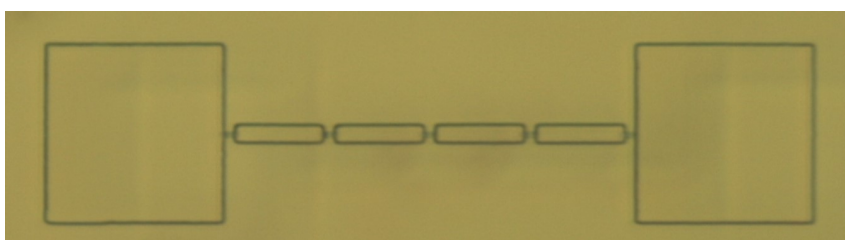


Figura 2.31: $t_{\text{exp}} = 1,9 \text{ s}$; $t_{\text{rev}} = 60 \text{ s}$. Contactos limpios con bordes bien definidos. La alineación entre ambas capas es aceptable.

De las figuras 2.28 - 2.31 se concluye que las **dosis adecuadas** de **exposición** y de **revelado** para la **segunda fotolitografía** son las siguientes:

$$t_{\text{exp}} \approx 1,9 \text{ s} ; t_{\text{rev}} = 60 \text{ s} .$$

Se llevarán a cabo dos procesos de *sputtering*, teniendo en cuenta el procedimiento explicado previamente. Sin embargo, esta vez no será necesario definir la imanación del material, luego se empleará un soporte convencional para el sustrato.

Primero, se depositará una capa de 8 nm de **titanio**, puesto que la adhesión del oro al vidrio es débil. Seguidamente, se creará la capa de **oro** de 100 nm perteneciente a los contactos. Los respectivos parámetros se recogen en la tabla 3.

Flujo _{Ar} (sccm)	p_{Ar} (μbar)	P (W)	ΔV (V)	I (A)	Esp. (nm)	t_{pre} (min)	t_{sp} (s)
11	2,5	70	384	0,18	8	6	40
11	2,5	70	369	0,19	100	2	2

Tabla 3: Parámetros de *sputtering* de Ti (primera fila) y Au (segunda fila).

La figura 2.32 muestra el resultado después de la deposición.



Figura 2.32: Deposición de oro en el sustrato.

Mediante el posterior paso de *lift off* se eliminará la película de oro, creando de esta forma los contactos.

Resultados tras la segunda deposición

En las siguientes figuras se recogen dos muestras de cruces y sus pertenecientes sensores y contactos.⁸



(a) Primera cruz



(b) Segunda cruz

Figura 2.33: Muestra 1. El alineamiento entre la primera capa de Py y la segunda de oro es adecuado.

⁸Se recomienda ampliar las imágenes.

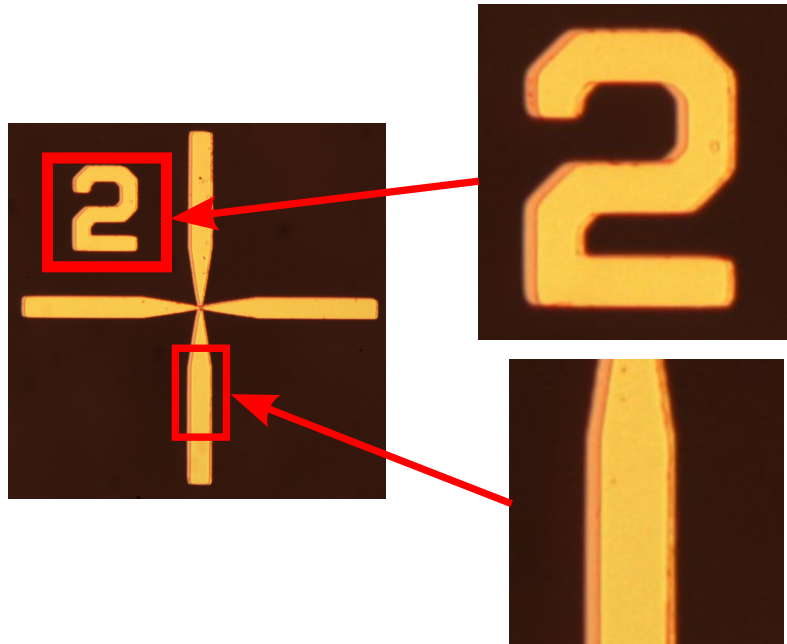


Figura 2.34: Muestra 2. El alineamiento entre ambas capas no es del todo acertado. De hecho, en la cruz 2 se puede observar un ligero desvío en el eje horizontal. Estos resultados son indicadores del hecho de que se ha trabajado al límite de la resolución de la máquina.

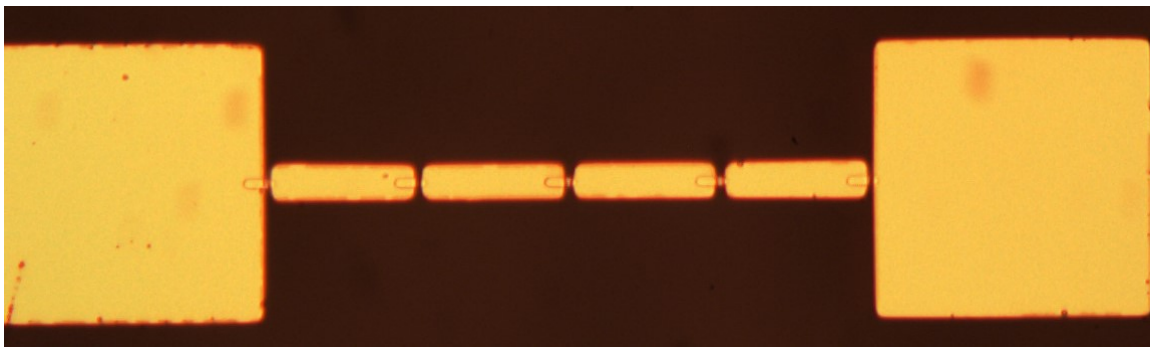


Figura 2.35: Muestra 1. Deposición de oro en los contactos pertenecientes a las cruces de la figura 2.33. Se puede apreciar un desplazamiento inesperado en horizontal entre sensores y contactos.

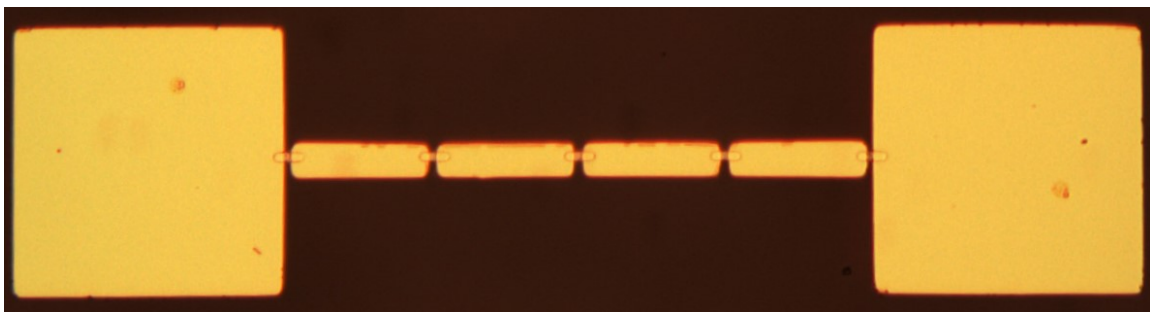


Figura 2.36: Muestra 2. Deposición de oro en los contactos pertenecientes a la cruz de la figura 2.34. En este caso, lo que cabe destacar es la excelente alineación entre sensores y contactos.

Considerando comentarios de las figuras 2.33 - 2.36, es evidente que la alineación entre las cruces no coincide con aquella entre sensores y contactos. Este factor se puede deber a pequeñas derivas en el ajuste de la posición del soporte del equipo de fotolitografía

mientras dura la exposición. De hecho, atendiendo a la figura 2.26, el soporte realiza seis cambios de coordenadas. Un pequeño desvío de incluso $0,5 \mu\text{m}$ puede acarrear resultados como el de la figura 2.35. Debido a ello, convendría ajustar el control del motor que hace mover el soporte.

De todos modos, en la mayoría de las sesiones finalmente se ha logrado alinear las dos capas de tal forma que la corriente pueda ser transmitida de los contactos al sensor. Por lo tanto, se han cumplido los objetivos propuestos inicialmente.

Habiendo ajustado y optimizado los procesos de exposición de ambas capas, se preparará un sustrato adicional con dos muestras para llevar a cabo mediciones de magnetorresistencia.

Sin embargo, previamente será necesario añadir una tercera capa de contactos exteriores.

2.5.3. Capa auxiliar de contactos exteriores

Las dimensiones de los contactos depositados en la segunda capa son demasiado reducidas, por lo que resultaría muy complicado conectar una muestra con un equipo externo sin dañar las estructuras. Con el fin de solucionar lo anterior, se depositarán contactos suplementarios de un tamaño considerablemente mayor ($1750 \times 2000 \mu\text{m}$) mediante un tercer paso de fotolitografía, de tal manera que puedan apreciarse a simple vista y asistan al usuario en las conexiones con el equipo de mediciones. Éstos deberán sobreponerse ligeramente a los contactos de la segunda capa (figura 2.37) para posibilitar la transmisión de la corriente eléctrica.

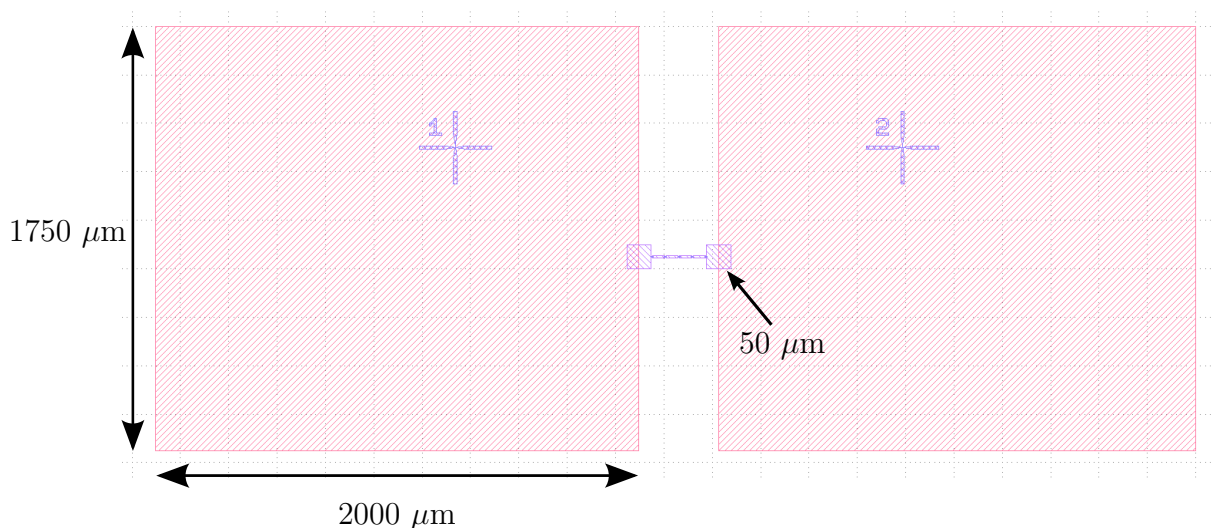


Figura 2.37: Dimensiones de los contactos exteriores.

Debido a sus grandes dimensiones, el objetivo $\times 10$ del equipo de *SmartPrint* se sustituirá por otro de menor aumento ($\times 2,5$). Además, esta vez se podrá prescindir del modo de alineamiento semiautomático (figura 2.38).

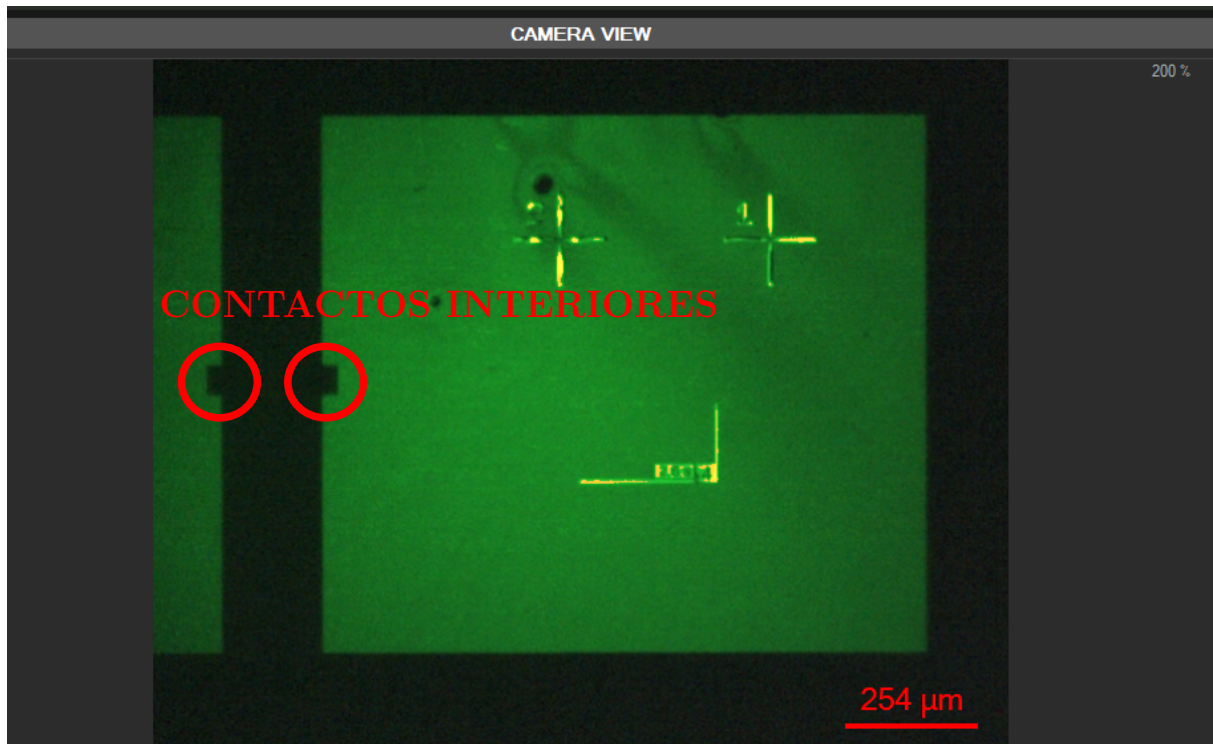


Figura 2.38: Alineamiento en **modo libre** entre la segunda capa (a vista de la cámara del equipo) y la tercera (proyección en color **verde**).

Como el objetivo $\times 2,5$ abarca un área mayor en el sustrato, se deberá incrementar considerablemente el tiempo de exposición. La dosis adecuada ha resultado ser la siguiente:

$$t_{\text{exp}} \approx 14 \text{ s} ; t_{\text{rev}} = 90 \text{ s} .$$

Después, se realizará la deposición de oro. En las imágenes 2.39 - 2.41 se muestran los resultados.



Figura 2.39: Contactos exteriores de oro a simple vista.

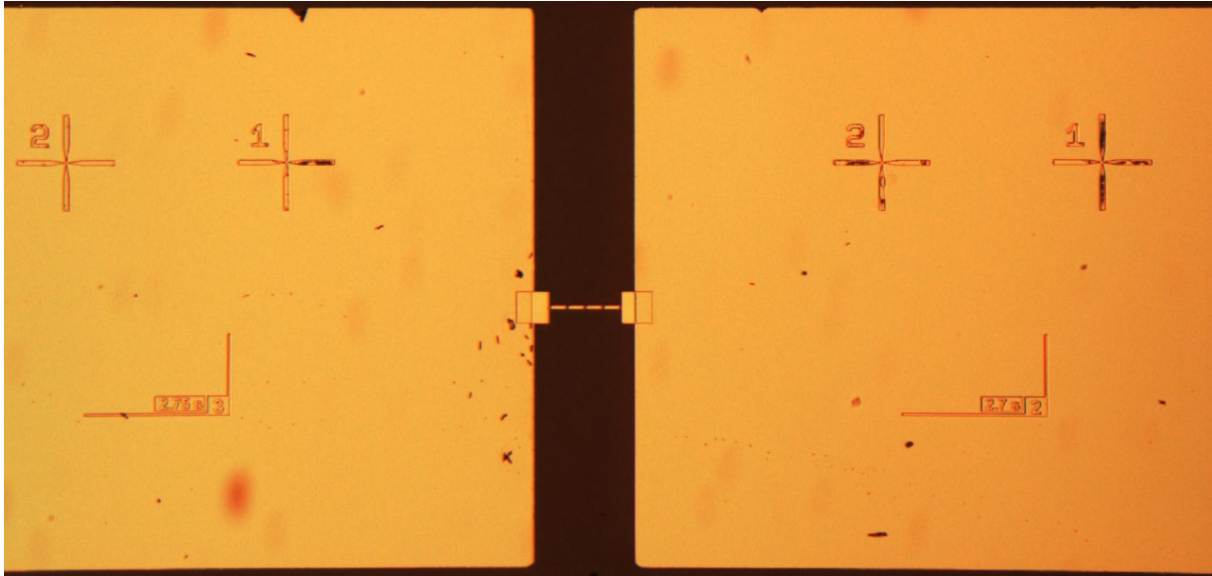


Figura 2.40: Contactos exteriores a vista de microscopio (objetivo $\times 2,5$).

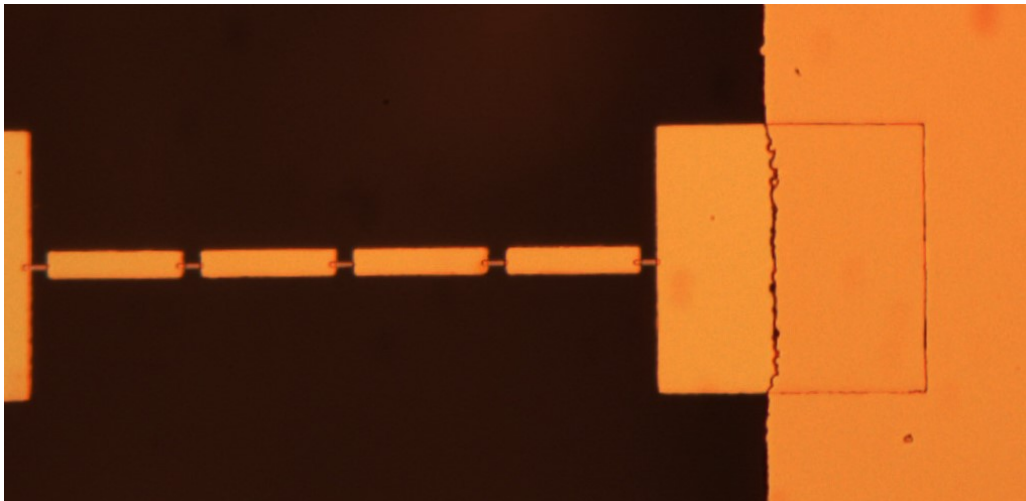


Figura 2.41: Área de superposición entre contactos (objetivo $\times 20$).

Llegados a este punto, cabe mencionar que originalmente se iba a efectuar una microsoldadura para unir los contactos interiores con el equipo de mediciones, trazando un hilo de $0,25 \mu\text{m}$ de espesor mediante un manipulador micrométrico. No obstante, la máquina destinada para este fin no se encuentra operativa actualmente, por lo que se ha tenido que recurrir a este procedimiento alternativo.

3. Mediciones de magnetorresistencia

Primero, se cortará parte del vidrio mediante una punta de diamante, puesto que sus dimensiones superan las del porta muestras de las mediciones. Como el sustrato de vidrio es muy quebradizo, corre el riesgo de dañar las estructuras, por lo que el corte se deberá efectuar con sumo cuidado. Acto seguido, se fijará con kapton, y se trazarán dos líneas de pintura de plata que unirán los contactos del porta muestras con los contactos externos de oro auxiliares.

Para comenzar, el soporte se colocará entre dos carretes circulares de Helmholtz, y se conectarán los cables en ambos extremos (figura 3.1). El sensor deberá quedar alineado con respecto al eje. La resistencia eléctrica se calculará midiendo el voltaje y la intensidad ($R = V/I$). Esto se realizará mediante la denominada *medida a cuatro puntas*.

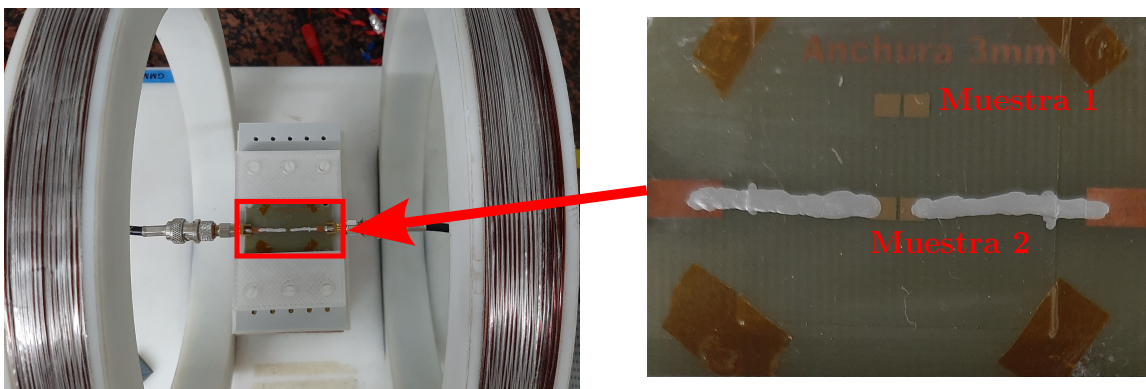


Figura 3.1: El soporte de las mediciones con el sustrato entre los carretes de Helmholtz. La **muestra 2** ha sido la elegida.

Se empleará una fuente de gran precisión (resolución de 1 nA), la cual hará circular una corriente de 0,5 mA en dirección paralela al eje largo del sensor. Un nanovoltímetro de 8 dígitos y medio de resolución medirá la tensión: 0,13 V. En consecuencia, el sensor mostrará una resistencia inicial de 266 Ω . Después, los carretes de Helmholtz generarán un campo magnético \mathbf{H}_{ext} . Como la muestra se ha colocado en el eje de los carretes, la dirección del campo externo será paralela a la corriente. El soporte especial empleado en la deposición del permalloy ha inducido una anisotropía transversal. En consecuencia, en ausencia del campo externo, el sensor presentará una imanación \mathbf{M} perpendicular a su eje largo (figura 3.2).



Figura 3.2: Imanación inicial de cada elemento del sensor y campo externo aplicado.

El objetivo es medir los cambios de la magnetorresistencia anisotropa (AMR). Este fenómeno es característico de los materiales ferromagnéticos. En ellos, la resistividad muestra una dependencia en el ángulo entre las direcciones de la corriente y la imanación. Cuando el campo externo es pequeño, los cambios en la resistividad se agudizan, debido a la rotación de la imanación. Por otro lado, si el campo aumenta, la resistividad debería adquirir un comportamiento lineal [16]. Considerando lo mencionado, se hará variar el valor del campo externo, siguiendo a este ciclo:

$$150 \text{ Oe} \rightarrow 0 \text{ Oe} \rightarrow -150 \text{ Oe} \rightarrow 0 \text{ Oe} \rightarrow 150 \text{ Oe} .$$

La imanación del sensor responderá a dicha variación. Al comienzo, se alineará con el campo. No obstante, a medida que el módulo de \mathbf{H}_{ext} disminuye, el sensor recobrará su imanación inicial. En consecuencia, la magnetorresistencia disminuirá, y alcanzará un mínimo en $\mathbf{H}_{\text{ext}} = \mathbf{0}$. A continuación, aumentará, llegando a un nuevo máximo. En el gráfico de la figura 3.3 se pueden observar los resultados de las mediciones.

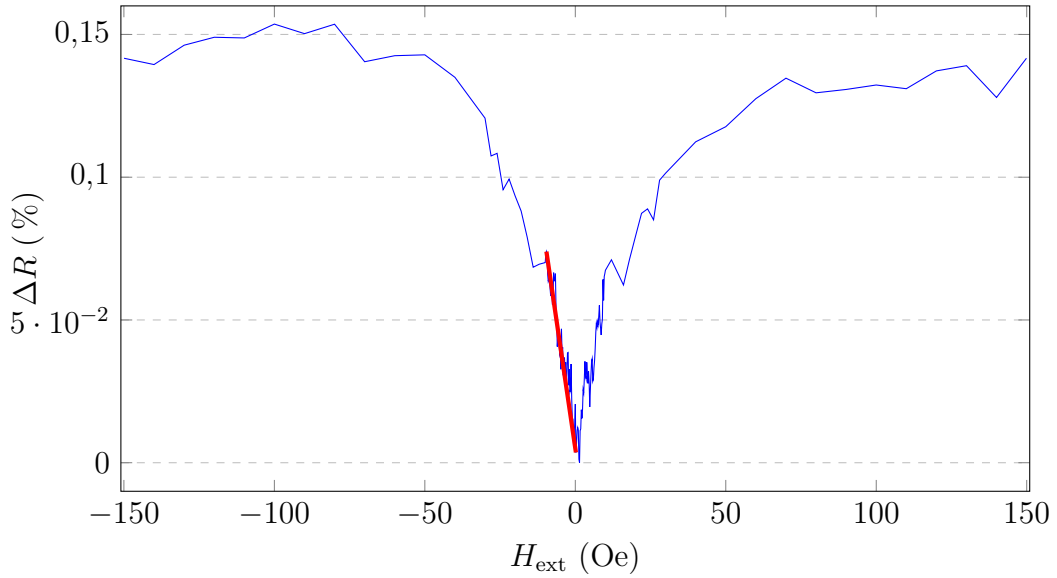


Figura 3.3: Cambio en porcentaje de la magnetorresistencia en el tramo de ida de las mediciones. A campos más bajos se ha incrementado el número de puntos.

En el gráfico se ha incluido únicamente el tramo de ida ($H_{\text{ext}} = 150 \text{ Oe} \rightarrow -150 \text{ Oe}$), en aras de mayor claridad visual. De hecho, se puede observar que, aunque la curva atiende a las explicaciones precedentes, el efecto del ruido es considerable, y de mayor agudeza en las zonas de campos pequeños ($|H_{\text{ext}}| < 10 \text{ Oe}$). Partiendo de dos puntos correspondientes a la zona lineal de la figura 3.3, se calculará la sensibilidad del sensor:

$$s = \frac{\Delta R}{\Delta H_{\text{ext}}} = \frac{(266,245 - 266,058) \Omega}{(-9,599 - 0,202) \text{ Oe}} = -0,02 \frac{\Omega}{\text{Oe}} . \quad (3.1)$$

Por otra parte, los valores de la figura 3.3 se han determinado por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta R (\%) = 100 \times \frac{R - R_{\text{min}}}{R_{\text{min}}} . \quad (3.2)$$

Así, el cambio máximo de magnetorresistencia es $\Delta R_{\max} (\%) = 0,154\%$. Este valor es relativamente pequeño. De hecho, los valores que se adquieren normalmente rondan el 4%; es decir, se esperaba una mayor caída en la zona sensible del sensor. Lo anterior se podría deber a deficiencias en el proceso de deposición del material. La muestra de permalloy se sometió a un proceso de mecanizado, lo cual alteró sus propiedades y deterioró su calidad. El equipo de *sputtering*, por su lado, ha sufrido percances recientemente, y se está trabajando de cara a optimizar los parámetros del proceso.

4. Complicaciones

A lo largo del desarrollo de las sesiones de la sala blanca, han surgido tres problemas principales que han ralentizado el progreso experimental. Todos ellos están asociados al equipo de fotolitografía de *SmartPrint*.

1. Inconsistencia en la dosis adecuada: A medida que aumenta el uso de la máquina, se han requerido mayores tiempos de exposición con el fin de evitar la tonalidad oscura en los patrones. A causa de lo anterior, se han tenido que efectuar tests de dosis con cierta regularidad. Las tablas 4 y 5 denotan lo mencionado. En enero de 2022 se compró un bote nuevo de resina fotosensible, por lo que los tiempos de exposición y revelado crecieron considerablemente. De todas maneras, en el caso del sensor, se puede observar un incremento de más de 1 s en 3 meses para la misma resina. En el caso de la capa de los contactos, el aumento ha sido de 1 s en 2 meses. Finalmente, cabe mencionar que este equipo se ha destinado únicamente al desarrollo del presente trabajo de fin de grado (2 ó 3 sesiones por semana). Si aumentara la frecuencia de su empleo, el problema en cuestión se vería acentuado. En cualquier caso, no se descarta que dicho incremento se pudiera deber a alteraciones en las propiedades la resina fotosensible, a causa de factores ambientales como la humedad o la exposición a la luz blanca.

Fecha	Tiempo de exposición (s)	Tiempo de revelado (s)
13/07/21	0,8	60
28/02/22	2,7	90
05/05/22	3,5	90
19/05/22	4	90

Tabla 4: Variación de la dosis de la primera capa.

Fecha	Tiempo de exposición (s)	Tiempo de revelado (s)
31/03/22	1,7	60
12/05/22	2,5	60
26/05/22	2,7	60

Tabla 5: Variación de la dosis de la segunda capa.

2. Incoherencia en el alineamiento: Como bien se ha indicado en la sección 2.5.2, pequeñas derivas en el posicionamiento del soporte han impedido que la correcta alineación se haya mantenido en la totalidad de la zona de interés. Una solución consistiría en prescindir del modo de alineamiento semi automático, y, por ende, de las cruces incluidas para este efecto. Pese a que el modo libre de alineamiento esté destinado a patrones de mayores dimensiones (objetivos $\times 1$ y $\times 2,5$) que no requieran un diseño en modo *stitching*, este método podría proporcionar resultados con la suficiente precisión y corrección.

3. Problemas con el soporte motorizado: En ocasiones, el motor del soporte no ha respondido a los comandos de la figura 2.8. Debido a ello, se ha tenido que recurrir al reinicio del equipo. Existe un cuaderno ubicado bajo la máquina que recoge las indicaciones a seguir ante este tipo de incidencias.

5. Conclusiones

Este trabajo de fin de grado ha sido caracterizado por un minucioso proceso de fabricación que tiene lugar en un ámbito de riguroso control y procedimientos especiales. Antes de dar comienzo al abordaje de las tareas, al usuario le resultó imprescindible la familiarización y adaptación a los procedimientos y conductas de la sala blanca.

En lo concerniente a la esencia del proyecto, la técnica de fotolitografía *maskless* ha supuesto una alternativa innovadora para la manufactura de sensores magnetorresistivos. No obstante, a lo largo del proceso han emergido diversas particularidades y defectos asociados al equipo empleado. La rápida variación de la dosis adecuada de exposición y el inconsistente alineamiento son factores que se deben examinar de cara a sesiones posteriores.

Sin embargo, considerando que las reducidas dimensiones de los elementos del sensor han conllevado trabajar en el límite de la resolución de la máquina, es lícito afirmar que la transferencia de patrones mediante la tecnología *maskless* ha resultado de gran éxito. Además, la posibilidad de diseñar y fabricar una capa adicional de contactos externos momentáneamente ha dejado de manifiesto la gran versatilidad del equipo. Cabe remarcar que una máquina tradicional de fotolitografía hubiera requerido la creación de una nueva fotomáscara física, incrementando los costes del proceso.

En definitiva, las sesiones desarrolladas en la sala blanca han servido como primer acercamiento a la fotolitografía sin máscara. Además, se ha observado que el equipo de *SmartPrint* es de fácil manejo y gran adaptabilidad. Teniendo esto último en cuenta, resultará especialmente fructífero en futuras aplicaciones relacionadas con diversas líneas de investigación.

Referencias

- [1] R. P. Feynman. “There’s Plenty of Room at the Bottom”. En: *Engineering and Science* 23 (1960), págs. 22-36. URL: <https://resolver.caltech.edu/CaltechES:23.5.1960Bottom>.
- [2] Apple. *Apple unveils M1 Ultra, the world’s most powerful chip for a personal computer*. URL: <https://www.apple.com/newsroom/2022/03/apple-unveils-m1-ultra-the-worlds-most-powerful-chip-for-a-personal-computer/> (visitado 20-06-2022).
- [3] J. D. Musgraves. “Maskless Projection Lithography”. En: *Pomona Senior Theses* 17 (2003). URL: https://scholarship.claremont.edu/pomona_theses/17.
- [4] D. de Cos y col. “Study of the influence of sensor permeability in the detection of a single magnetotactic bacterium”. En: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 500 (2020), pág. 166346. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.166346>.
- [5] Particle Measuring Systems. *Cleanroom Classification*. URL: <https://www.pmeasuring.com/blog/cleanroom-classification/> (visitado 20-06-2022).
- [6] AllResist GmbH. “PHOTORESISTS AND SPECIAL RESISTS”. En: págs. 6-10. URL: https://www.allresist.com/wp-content/uploads/sites/2/2021/05/Allresist_Product-information-PhotoresistSpecial-resist-English-web.pdf.
- [7] FSi. *KLayout Viewer and Editor*. URL: <https://www.klayout.de/intro.html> (visitado 20-06-2022).
- [8] Microlight 3D. *Maskless Lithography*. URL: <http://www.smartforcetechnologies.com/products/smartprint> (visitado 20-06-2022).
- [9] Science Direct. *Photoresist*. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/photoresist> (visitado 20-06-2022).
- [10] Science Direct. *Ultrasonic Cleaning*. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/ultrasonic-cleaning> (visitado 20-06-2022).
- [11] AllResist GmbH. *AR 300-80 HMDS Adhesion Promoter*. URL: https://www.allresist.com/wp-content/uploads/sites/2/2021/02/Allresist_Product-information_Adhesions-Promoter_AR-300-80new_HMDS_English_web.pdf (visitado 20-06-2022).
- [12] AllResist GmbH. *AR-P 5350 Positive Photoresist*. URL: <https://www.allresist.com/portfolio-item/photoresist-ar-p-5350/> (visitado 20-06-2022).
- [13] AllResist GmbH. *AR 300-35 Developer*. URL: <https://www.allresist.com/portfolio-item/developer-ar-300-35/> (visitado 20-06-2022).
- [14] Tesis de E. Fernández. “Thin-film MagnetoImpedance micro-structures for sensing applications”. En: *Dep. Electricidad y Electrónica, ZTF/FCT, UPV/EHU* (2013), págs. 16-19.
- [15] Science Direct. *Sputter Deposition*. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/sputter-deposition> (visitado 20-06-2022).
- [16] Science Direct. *Anisotropic Magnetoresistance*. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/anisotropic-magnetoresistance> (visitado 21-06-2022).