



Proceso de microfabricación

1. Introducción

Desde los albores de la humanidad, hemos tenido una necesidad innata de replicar y perfeccionar los procesos de la naturaleza para crear herramientas, bienes y tecnología. Imagine a un artesano tallando meticulosamente una única pieza de madera. Es un proceso lento, intensivo en mano de obra y donde cada producto, aunque similar, es inherentemente único. Esta es la esencia de la **manufactura artesanal**.

La Revolución Industrial marcó el salto crucial: la **automatización**. En lugar de un artesano haciendo todo, se ideó una línea de producción donde una serie de máquinas especializadas realizan tarea específicas y repetitivas: cortar, moldear, pulir, ensamblar. Un brazo robótico suelda una chapa, otro pinta, otro coloca una pieza. Esta coreografía automatizada permite producir miles de unidades idénticas, dentro de un rango de tolerancia.

Pero, ¿y si nuestra ambición no fuera solo fabricar muchos objetos, sino fabricar objetos increíblemente pequeños y complejos? ¿Y si el producto final no fuera un auto, sino un sensor que quepa en la yema de un dedo?

Bienvenido al mundo de la Microfabricación.

La microfabricación es la disciplina de ingeniería que aplica los principios fundamentales de la manufactura—diseño, deposición de materiales, patronado, grabado y ensamblaje—pero a una escala micrométrica. Es la **automatización** y el **escalado** llevados a la escala de lo microscópico.

Imagine la línea de producción de ese auto, pero miniaturizada:

- Los **brazos robóticos** son ahora haces de luz (fotolitografía) o rayos de electrones que "tallan" diseños con una precisión micrométrica/nanométrica.
- Los **materiales** no son acero o plástico, sino finísimas capas de silicio, dióxido de silicio o metales, depositados átomo a átomo en cámaras de vacío ultralimpio (como una soldadura a escala atómica).
- Los procesos de **corte y grabado** no se hacen con sierras o láseres industriales, sino con baños químicos corrosivos (grabado húmedo) o con plasmas de gases reactivos (grabado en seco) que disuelven el material no deseado con una precisión absoluta.
- La **línea de ensamblaje** es la propia oblea de silicio, que pasa de una "estación de trabajo" (una máquina especializada) a otra dentro de una sala amarilla, donde cada paso añade una nueva capa de complejidad al dispositivo final.



Este proceso de fabricación secuencial y aditivo, no muy diferente de imprimir un documento en capas de tinta de colores, permite crear estructuras y circuitos integrados de una complejidad asombrosa.

La microfabricación es la columna vertebral de la tecnología moderna. Es lo que hace posible no solo los microprocesadores y memorias de nuestros dispositivos, sino también los **MEMS** (Sistemas Microelectromecánicos) como los acelerómetros que orientan la pantalla de los smartphones, los sensores de presión, los proyectores DLP, los laboratorios-en-un-chip para diagnóstico médico, y dispositivos médicos implantables.

2. Litografía Láser directa

La técnica desarrollada, dado los equipos disponibles, es la **litografía láser directa**. Permite crear patrones precisos sobre superficies, comúnmente empleada en la producción de micro y nanoestructuras. La misma, utiliza un láser de alta resolución para grabar directamente un material fotosensible o resina, sin necesidad de una máscara física como en la litografía tradicional, como puede verse en el esquema de la Fig. 1. Esta técnica es muy utilizada en la producción de circuitos integrados, dispositivos microfluídicos y MEMS.

El laboratorio cuenta con un sistema de litografía láser directa (μ Laser) de la marca Argentina *Mutech*[®] [1], el mismo puede verse en la Fig. 2. Además se cuenta con la fotoresina *Microposit*[™] 1414 de *Shimadzu*[®] como soporte de la transferencia del patrón micrométrico.

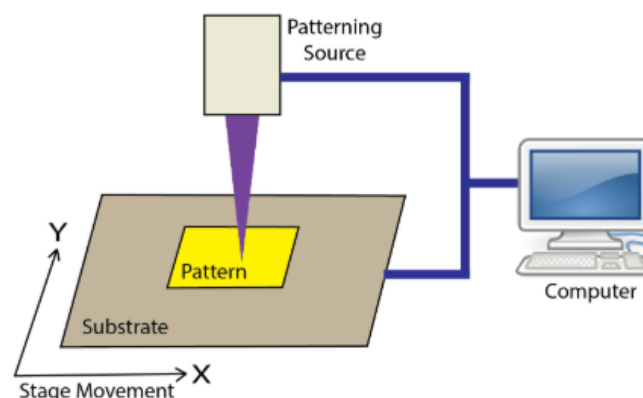


Figura 1: Esquema básico de un sistema de litografía láser directa. Imagen extraída de inf-wiki.eecs.umich.edu.

3. Sala Amarilla

La Sala Amarilla constituye un entorno controlado esencial para las etapas iniciales de procesamiento en microfabricación, específicamente para los procesos de preparación de

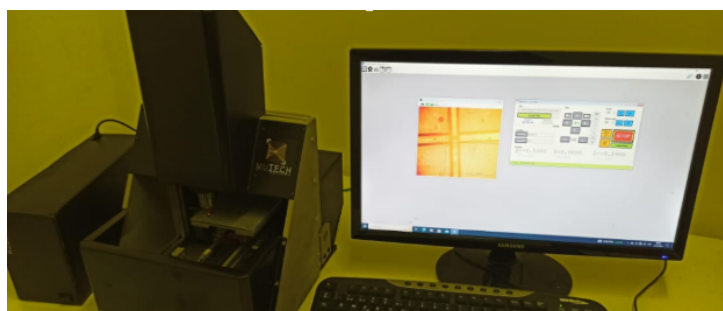


Figura 2: Litógrafo láser en sala amarilla.

sustratos y fotolitografía. Este espacio se encuentra acondicionado como una habitación, equipada con mobiliario fijo que incluye estanterías y dos mesas de trabajo.

Una de las mesas está destinada al trabajo manual de preparación de sustratos, tal como se ilustra en la Fig. 3. En esta área se llevan a cabo los procesos de limpieza, secado y deposición inicial de resinas. El equipamiento principal ubicado en esta mesada consiste en:

- Un *Spin Coater* (deposición por giro), cuyo funcionamiento se basa en la deposición de la fotoresina sobre el sustrato y su posterior distribución uniforme mediante rotación a alta velocidad, generando una capa delgada y homogénea gracias a la fuerza centrífuga.
- Una placa calefactora programable, utilizada para el proceso de *bake* o pre-horneado. La función de este equipo es la evaporación controlada de los solventes presentes en la resina depositada, solidificando la capa y mejorando su adhesión al sustrato.
- Un secador de pelo modificado, el cual se emplea como sustituto de aire comprimido.

La característica definitoria de la sala, y de la cual deriva su nombre, es la iluminación amarilla. Esta condición lumínica es un requisito fundamental para manipular materiales fotosensibles de manera segura. La longitud de onda específica de la luz amarilla carece de la energía suficiente para inducir una reacción fotoquímica en las resistas comerciales estándar, lo que permite trabajar con ellas sin riesgo de velado o exposición no deseada previa al proceso de litografía.

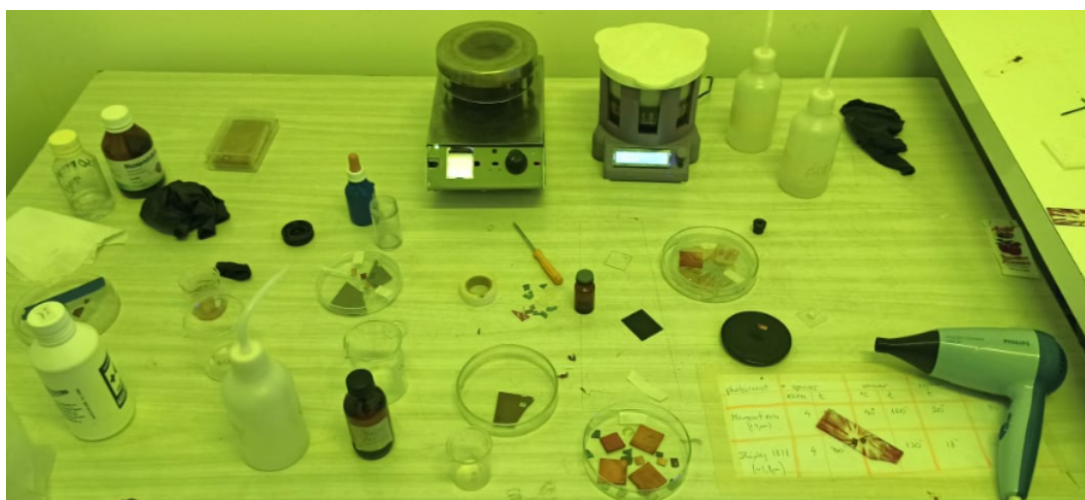


Figura 3: Mesada de trabajo

4. Proceso de microfabricación

El proceso se describe a continuación por etapas. Puede verse en la Fig. 4 y gráficamente de forma simplificada en la Fig. 5.

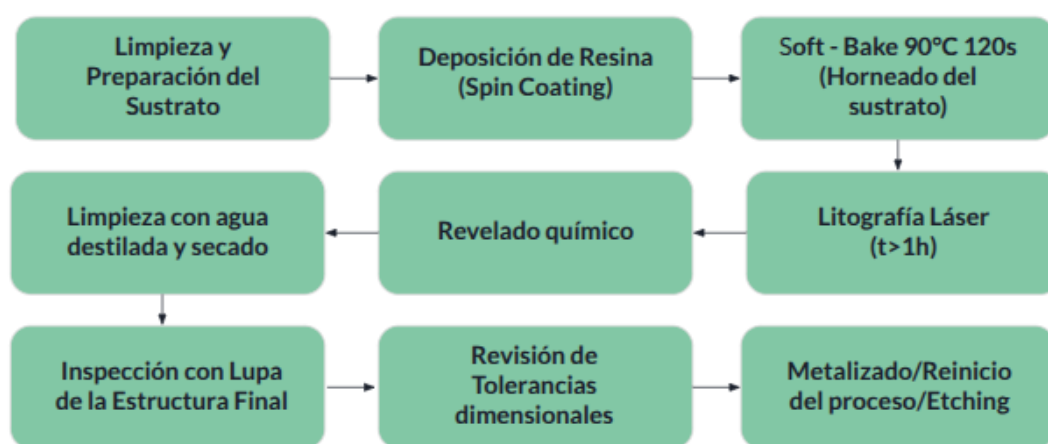


Figura 4: Proceso de microfabricación

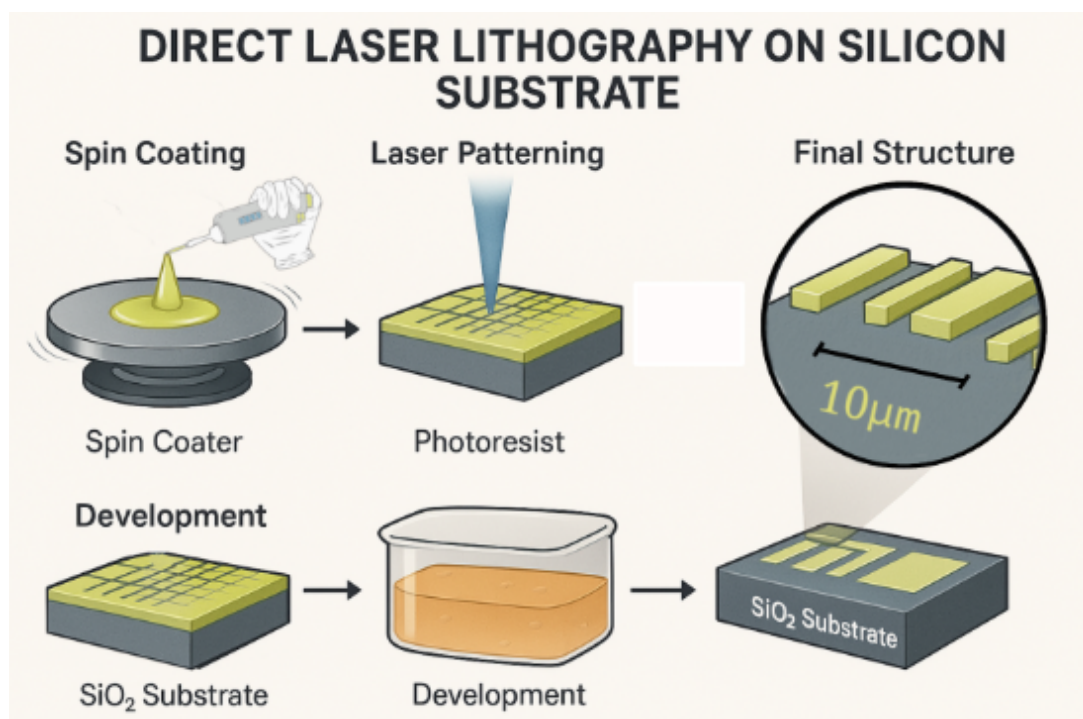


Figura 5: Proceso de microfabricación, esquema gráfico del proceso. *Imagen realizada con IA y modificada*

4.1. Preparación del Sustrato

La preparación del sustrato es una etapa crítica que inicia con la limpieza de su superficie, dado que las características a transferir en el proceso poseen el tamaño del polvo del ambiente y determinan un obstáculo importante. Se recomienda iniciar el proceso utilizando agua destilada, pudiendo emplear un detergente suave si la contaminación superficial lo requiere, con el objetivo de obtener un sustrato visualmente limpio. Para una limpieza a nivel microescala, se procede con un protocolo químico secuencial que implica el uso de acetona seguido de alcohol isopropílico, asegurando la remoción de contaminantes orgánicos e iónicos. La evaporación rápida de los solventes residuales se realiza con un secador de aire. La verificación final de la limpieza debe realizarse mediante inspección con lupa binocular antes de proceder a la siguiente etapa.

4.2. Deposición de la Fotoresina (*Spin Coating*)

Sobre el sustrato previamente limpiado (típicamente vidrio, silicio, Si, o silicio con una capa de óxido, SiO_2 , dependiendo de la aplicación específica) se deposita una gota de fotoresina en su centro. Este sustrato se coloca luego en un *spin coater*, donde se somete a un proceso de rotación a alta velocidad. Este proceso genera una fuerza centrífuga que distribuye la resina de manera homogénea, permitiendo un control preciso y reproducible del espesor de la capa depositada.



4.3. Horneado Suave (*Soft Bake*)

Posterior al recubrimiento, el sustrato se somete a un tratamiento térmico denominado *soft bake*. Este se realiza en una placa calefactora a temperaturas que, para la resina utilizada, typically oscilan entre 90 °C y 110 °C, por un tiempo determinado que debe obtenerse de la hoja de datos (*datasheet*) del material. La función principal de esta etapa es evaporar los solventes residuales presentes en la fotoresina, lo que mejora significativamente su adherencia al sustrato y aumenta su estabilidad térmica y dimensional durante la posterior exposición láser.

4.4. Grabado Láser Directo (*Direct Laser Writing*)

Un haz láser focalizado, con una longitud de onda de 405 nm, se emplea para escribir directamente los micropatrones deseados sobre la superficie recubierta. La energía del fotón induce una modificación en la estructura química de la fotoresina en las regiones expuestas. Este cambio permite su remoción selectiva durante la etapa de revelado, mediante un proceso de polimerización cruzada (para resinas negativas) o de lisis de la cadena polimérica (para resinas positivas).

4.5. Revelado (*Development*)

El sustrato expuesto se sumerge en una solución reveladora química específica. Esta solución disuelve selectivamente las zonas de la resina que han sido modificadas por la exposición al láser en el caso de una resina positiva, o las zonas no expuestas en el caso de una resina negativa. Este paso es crucial para transferir el patrón diseñado y obtener estructuras bien definidas con alto contraste y resolución.

4.6. Limpieza Posterior al Revelado

Tras el revelado, es esencial un enjuague minucioso con agua destilada para detener la reacción química del revelador y eliminar cualquier traza residual de la solución. Un secado posterior asegura la obtención de una superficie libre de contaminantes que puedan interferir con procesos subsiguientes.

4.7. Inspección de la Estructura Final

El resultado del proceso es una estructura de fotoresina patronada sobre el sustrato. Esta estructura puede actuar como una máscara para procesos posteriores de grabado húmedo o seco (*etching*) o de deposición de metales. Las características geométricas obtenidas pueden abarcar desde escalas milimétricas hasta micrométricas. La inspección con



lupa o microscopio es imperativa para evaluar la calidad del grabado, identificar defectos como un sub-revelado o sobre-revelado, y determinar la necesidad de repetir el proceso.

4.8. Revisión de Tolerancias y Control de Calidad

Aunque no constituye una etapa de fabricación *per se*, la revisión metrológica de las dimensiones de las características fabricadas contra las tolerancias de diseño es una práctica indispensable para asegurar la calidad y el rendimiento del patrón microfabricado.

4.9. Deposición de Metales o Grabado

Para conferir funcionalidad eléctrica al patrón transferido, se realiza un proceso de metalización. La elección del momento para esta etapa (ya sea al inicio, creando un sustrato conductor, o al final, sobre la estructura de resina patronada) depende críticamente de la técnica de litografía empleada y del tipo de fotoresina utilizada.

Referencias

- [1] Mutech Microsystems: Mutech Microsystems. (2025). <https://mutech.com.ar/home>