

6. SU-8

Una vez realizada la visión general de polímeros en tecnología MEMS se presenta un estado del arte completo del polímero elegido para la realización de dispositivos flow focusing. Dicha elección se debe a consideraciones económicas como el bajo precio del equipamiento necesario para tratarlo comparado con el precio de las máquinas necesarias para otro tipo de materiales, así como el precio del producto en sí. El hecho de ser biocompatible, con buena resistencia química y mecánica también hacen de él una buena elección para la realización de estructuras fluidicas. Y en particular, el hecho de ser hidrófobo es de especial interés en la técnica flow focusing.

6.1. Definición

El polímero SU-8 es una resina epoxy negativa fotosensible a la radiación ultravioleta, es decir, a una longitud de onda de aproximadamente 365nm. Es un compuesto formado por la resina epoxy bisphenol-A/ formaldehyde Novolac y un disolvente orgánico, que dependiendo del tipo de SU-8, será gamma-butyrolactone (GBL) o cyclopentanone. La función de dicho disolvente es determinar la viscosidad del SU-8, en función de la cantidad de disolvente se tienen SU-8 propicios para conseguir espesores determinados. Al principio, el único disolvente existente era el GBL, sin embargo, posteriormente la empresa MicroChem desarrollo la serie “SU-8 2000” en la que se sustituyó el GBL por ciclopentanona para conseguir de esta forma una mayor capacidad de adhesión en los sustratos.

La molécula del polímero se puede ver en la figura siguiente, Fig.26. donde pueden apreciarse los 8 grupos epoxy, cuatro de ellos en la parte superior y los otros cuatro en la inferior.

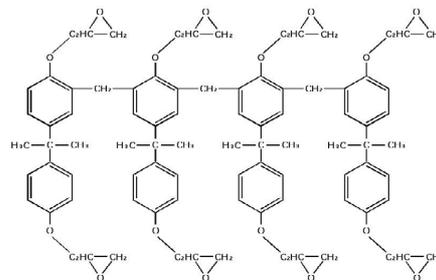


Fig.26. Estructura de la molécula de SU-8. Pueden observarse los grupos epoxy en la parte superior e inferior.

6.2. Historia

El polímero SU-8 fue desarrollado y patentado (US Patent nº 4882245 (1989) y otros) por IMB-Watson Research Center (Yorktown Heights – USA). En 1996 fue adoptado para aplicaciones MEMS durante una conferencia entre EPFL – Institute of Microsystems y IBM-Zurich.

Originalmente se desarrolló para proporcionar una alta resolución como resina negativa, para el uso en la fabricación de dispositivos semiconductores avanzados.

Actualmente es uno de los polímeros más utilizados en la realización de microsistemas. Y su aparición en artículos es cada vez más frecuente debido a las interesantes propiedades que posee y que veremos en el siguiente apartado.

6.3. Propiedades

A continuación se presenta una tabla con las propiedades características del SU-8, y seguidamente se comentarán algunas otras.

En la tabla aparecen valores distintos dependiendo de la fuente de la que fueron obtenidos.

M.Poisson	Condiciones [17]	0.22
	Condiciones [19]	0.33
	Condiciones [19]	0.29
Viscosidad dinámica [17]	0.4SU8+0.6Solvent	0.06 Pa.s
	0.6SU8+0.4Solvent	1.5 Pa.s
	0.7SU8+0.3Solvent	15 Pa.s
CTE, Coeficiente de expansión térmica.	Condiciones [17]	52 (ppm/K)
	Condiciones [17]	30 (ppm/K)
	Condiciones [17]	21 (ppm/K)
	Condiciones [18]	50 (ppm/K)
	Condiciones [19]	87.1 (ppm/K)
Conductividad térmica	Condiciones [19]	278 (ppm/K)
	Condiciones [17]	0.2 (W/mK)
Temperatura de transición vítrea	Condiciones [17]	>200 °C
	Condiciones [17]	55 °C
	Condiciones [17]	50°C
Temperatura de degradación	Condiciones [17]	~380°C
Índice de refracción	Condiciones [17]	1.67
	Condiciones [17]	1.596
	Condiciones [17]	1.575
	Condiciones [17]	1.7
	Condiciones [17]	1.8

E, Modulo de Young	Condiciones [17]	4.02 GPa.
	Condiciones [17]	4.95(+/-)0.4 GPa
	Condiciones [17]	4.4 Gpa
	Condiciones [19]	3.2 Gpa
	Condiciones [19]	5.9 GPa
	Condiciones [19]	5.18 GPa
Film Stress	Condiciones [17]	19 – 16 MPa
Max Stress	Condiciones [17]	34 MPa
Coefficiente de fricción	Condiciones [17]	0.19
Viscosidad cinemática [17]	SU8(5) (52% sólido)	290 cSt
	SU8(10) (59% sólido)	1050 cSt
	SU8(25) (63% sólido)	2500 cSt
	SU8(50) (69% sólido)	12250 cSt
	SU8(100) (73% sólido)	51500 cSt
Coefficiente de absorción	Condiciones [17]	2 cm ⁻¹
	Condiciones [17]	40 cm ⁻¹
Constante dieléctrica relativa	Condiciones [17]	3
	Condiciones [17]	4
	Condiciones [17]	4.2
	Condiciones [17]	4.5

Además de las propiedades vistas en la tabla, que se refiere a propiedades térmicas, electromagnéticas y mecánicas existen otras que se comentan a continuación.

- a) Es un material biocompatible: lo que lo hace interesante en dispositivos para aplicaciones médicas.
- b) Es hidrófobo: esta propiedad es importante a la hora de fabricar dispositivos flow focusing, puesto que de esta forma se evita que el chorro se pegue a las paredes. No obstante, si se trata con plasma de oxígeno puede adquirir propiedades hidrofílicas [20].
- c) Es de bajo coste: es una ventaja económica así como para la realización de prototipos rápidos.
- d) Tiene buena resistencia mecánica y química: Es más rígido que el PDMS y por tanto se minimiza el riesgo de deformación de estructuras.
- e) No se le ha observado dominio plástico [17].

- f) Es transparente: la transparencia es interesante a la hora de realizar dispositivos microfluídicos debido a la posibilidad de poder ver el camino que realizan los fluidos.
- g) Existe la posibilidad de encontrar SU-8 conductor [17 y 21]. Se le puede dar al SU-8 la propiedad de conducir corriente eléctrica, esta tarea se puede hacer de varias formas:

- Adición de nanopartículas: Consiste en añadir nanopartículas de plata al monómero.

Ventaja: Es la forma de conseguir mayor conductividad, que dependerá de la proporción de nanopartículas que se añadan. El rango de conductividad esta entre $(10-10^7)$ Sm.

Inconvenientes: Las partículas de plata no son transparentes a los rayos ultravioletas, por lo tanto se pierde resolución, dicha resolución se encuentra entre $(5-35)$ μ m correspondiendo la menor resolución a capas con espesores menores a 10 μ m. La polimerización del SU-8 con partículas de plata es inestable y no polimeriza bien.

- Uso de polímeros conductores: Usar polímeros conductores y más concretamente la polianilina.

6.4. Proceso típico de fabricación

El proceso SU-8 consiste en hacer micropartes 3D de fotorresina usando un método automático y preciso. La estructura de SU-8 se logra con iluminación UV (~ 365 nm) sobre la resina epoxy a través de una máscara.

Una de las ventajas que presenta es el rango de espesores que se puede obtener en un spin coating, $(650\text{nm} - 500\mu\text{m})$ con un spin coater convencional, y perfiles de pared vertical a lo alto de toda la estructura.

La SU-8 es una fotorresina negativa tipo epoxy en el rango UV, puede tener espesores de 2 mm con razones de aspecto mayores que 25 con litografía UV. Si en lugar de usar radiación UV, se usa una radiación de protones MeV, la relación de aspecto puede

llegar a ser aproximadamente de 100. En este último caso, la dosis de exposición debe rondar los 10-40 nC/mm² para una irradiación completa [17].

Los sustratos típicos para la realización de estructuras en SU-8 son:

- a) Silicio: Es el único de los sustratos presentados que es opaco a la radiación ultravioleta, y por tanto el proceso de fabricación pierde versatilidad como se verá más adelante. Un ejemplo de la utilización de este sustrato se puede ver en [22].
- b) Vidrio y Pyrex: Es el más común de todos los sustratos junto con el silicio. Se trata de un sustrato transparente a la radiación ultravioleta y a la luz blanca, y por tanto es interesante a la hora de realizar dispositivos fluidicos. Un ejemplo de la utilización de estos sustratos se puede ver en [23 y 24].
- c) Cuarzo: Al igual que el vidrio es un material que se ha venido usando como sustrato debido a su transparencia a los UV, pero de uso menos común.
- d) Zafiro: Se trata de otro sustrato transparente a la radiación ultravioleta de uso poco común.
- e) PMMA: Algunos autores han conseguido depositar SU-8 en PMMA [25]. Es una alternativa interesante debido al alto coste de los sustratos, aunque podría presentar problemas si el control de temperatura no es óptimo, debido a que la temperatura de transición vítrea por ejemplo del 495PMMA y 950PMMA (PMMA de MichoChem) presentan una temperatura de transición vítrea de entre 95 – 106 °C.

El proceso típico consta de los siguientes pasos:

- a) Limpieza del sustrato.
En primer lugar, se limpia el sustrato con una solución piraña (Solución de ácido sulfúrico y agua oxigenada, (H₂SO₄ + H₂O₂), para eliminar de esta forma toda la suciedad y restos de materia orgánica.
- b) Deshidratación.

Este paso consiste en someter a la oblea a una temperatura de 200 °C durante 1h para conseguir eliminar cualquier resto de humedad que quedase tras el limpiado.

c) Adhesión

La adhesión del SU-8 depende del material con el que se quiera pegar, por ejemplo, la adhesión con oro es mala, con silicio y óxido de silicio media, y con nitruro de silicio (SiN) buena. La adhesión de SU-8 parece estar afectada por el agente químico con el que se trate, provocando despegue en la inmersión en KOH y TMAH, mientras que permanece pegada con HF.

Para aumentar la adhesión del SU-8 al vidrio o a las obleas de Si se usa un aditivo que mejora la adhesión.

Se ha estado utilizando el clásico aditivo HMDS (Hexametildisilazane), que se usa para películas finas de fotorresinas en fabricación microelectrónica.

Otra elección es el uso de una molécula epoxy de tal forma que tiene un grupo metilo que se ancla en el vidrio o el silicio, y por la otra cara un grupo epoxy reacciona con SU-8.

Como se señaló anteriormente, MicroChem con su nueva serie SU-8 2000, en la que se sustituye el GBL por ciclopentanona, ofrece una mejor adhesión para la mayoría de los materiales debido al cambio de dicho disolvente.

d) Deposición

El paso de la deposición comúnmente conocido como spin coating es un paso mediante el cual se consigue una capa de SU-8 de espesor determinado. Dicho espesor se controla con dos parámetros, por un lado la viscosidad del SU-8 que se está tratando, y por otro las revoluciones por minuto a las que se somete la oblea en la máquina usada para este fin. Dicha máquina se denomina spin coater. Normalmente, el fabricante del SU-8 proporciona las curvas espesor-rpm. La siguiente gráfica es un ejemplo de las curvas proporcionadas por MicroChem para el SU-8 2150.

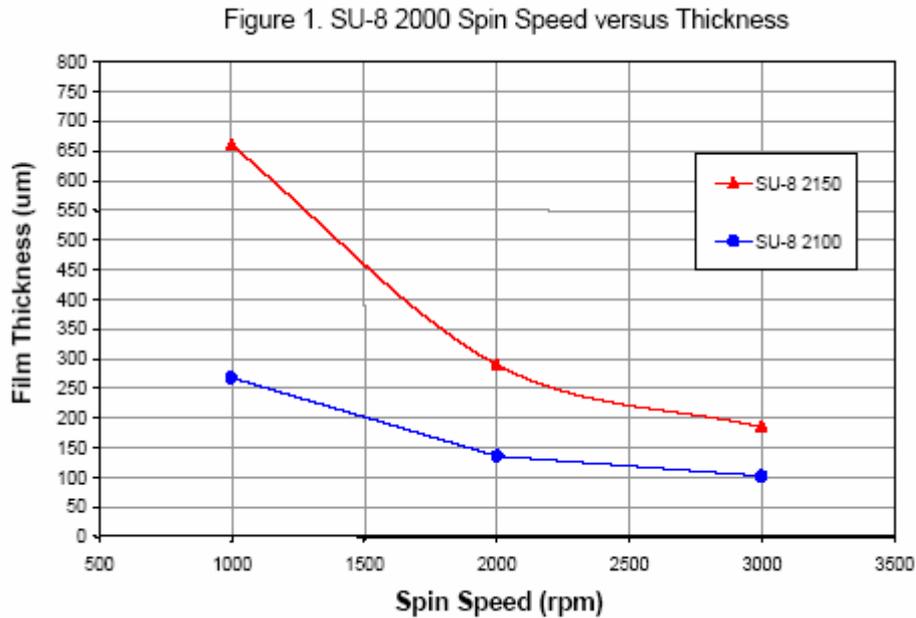


Fig.27. Espesor de capa frente a revoluciones por minutos para SU-8 2150. Gráfica proporcionada por MicroChem.

La deposición de la resina en el spin coater se puede realizar mediante pipeta, sin embargo algunos autores aconsejan dispensar directamente desde la botella [17].

e) Softbake

Este paso, también conocido como prebake, se realiza para eliminar el disolvente del SU-8 consiguiendo de esta forma que solidifique. El softbake consiste en calentar el SU-8 en un horno o en un hotplate hasta conseguir eliminar el disolvente. La utilización de horno no es muy aconsejable debido a que el calentamiento se realiza desde todas las superficies hacia dentro, esto provoca la aparición de una cáscara que no permite la salida de las burbujas de disolvente al exterior. Por ello, lo más recomendable es la utilización de hotplate, en cuyo caso el calentamiento se realiza de abajo hacia arriba, de forma que dicho gradiente favorece la expulsión de las burbujas. Es de vital importancia, sobre todo para SU-8 poco viscosos que el hotplate esté totalmente plano, puesto que una pequeña inclinación hace que la resina fluya considerablemente perdiendo de esta forma la uniformidad de espesor en la capa depositada.

La eliminación de disolvente es de vital importancia si se va a utilizar un hard-contact a la hora de realizar la fotolitografía, puesto que en caso contrario, se

puede producir sticking, es decir, que la máscara quede pegada en el SU-8 y al quitarlo produzca imperfecciones en la superficie.

Una manera de saber si el softbake está terminado consiste en sacar la oblea del hotplate, dejarla que se enfríe y si aparecen arrugas en la superficie es que el softbake todavía no ha terminado. Por tanto, hay que poner otra vez la oblea en el hotplate.

Las temperaturas que se utilizan para realizar el softbake son 65 °C durante 5 minutos, y luego 95 °C durante un tiempo que depende del espesor de la capa de SU-8 depositado. En este caso el fabricante proporciona una tabla de tiempos dependiendo de los espesores que se han conseguido. Un ejemplo de ello es la siguiente tabla, que proporciona MicroChem para la resina SU-8 2150.

THICKNESS microns	SOFT BAKE TIMES	
	(65°C)* minutes	(95°C) minutes
100 - 150	5	20 - 30
160 - 225	5 - 7	30 - 45
230 - 270	7	45 - 60
280 - 550	7 - 10	60 - 120

f) Exposición

La exposición consiste en iluminar la resina con rayos ultravioletas, utilizando la máscara para definir qué parte de la deposición se quiere eliminar y cuál no. La exposición depende del tipo de sustrato y del espesor de la capa depositada.

Dependiendo del tipo de sustrato que se tenga se tienen varias opciones a la hora de realizar la exposición.

a) Sustrato opaco.

En este caso sólo hay una forma de iluminar que consiste en exponer a la radiación ultravioleta directamente sobre la máscara, dejando el sustrato en la cara opuesta.

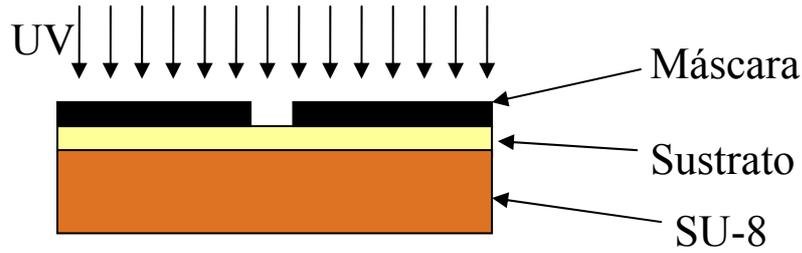


Fig.28. Exposición por la cara superior de la oblea.

b) Sustrato transparente.

En el caso del sustrato transparente a los UV se tienen más opciones de iluminación. Se puede iluminar como en el caso interior, por la cara de arriba pero también por la cara inferior a través del sustrato. O utilizar una estrategia de iluminación que englobe las dos opciones. En el caso de realizar la exposición a través del sustrato es necesario tener en cuenta los índices de refracción de los materiales.

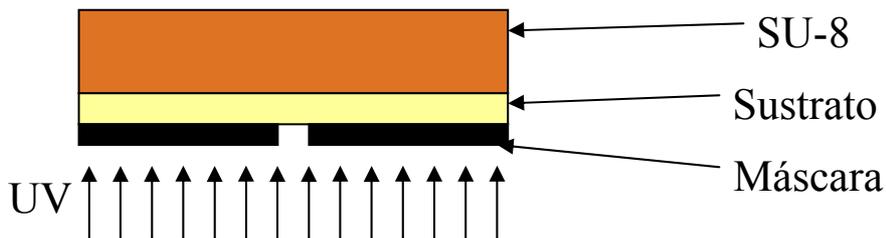


Fig.29. Exposición por la cara inferior de la oblea

Para conseguir un mejor acabado en las paredes se suelen utilizar filtros como por ejemplo el Hoya UV-34 de 2.5 micras de espesor (transmitancia: el 0% en 325nm, el 50% en 350nm, el >80% en 370nm y superior). A continuación se presentan dos imágenes [17] en las que se puede comprobar la diferencia entre usar tales filtros y no utilizarlos.

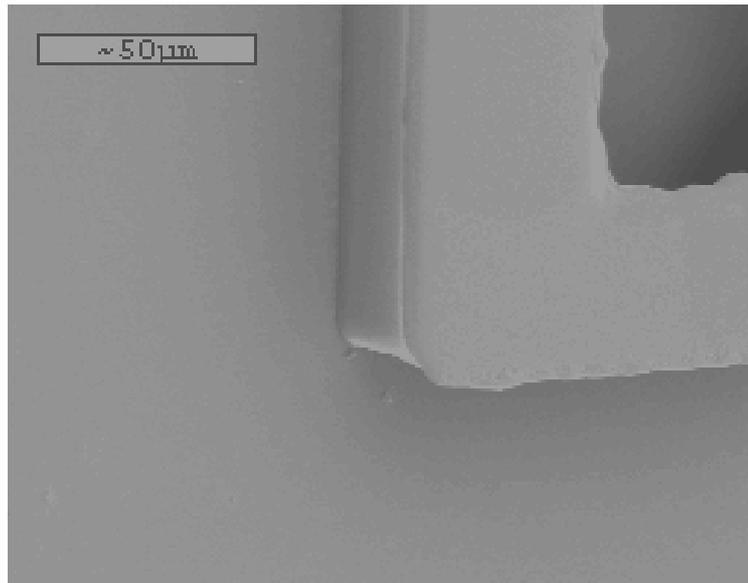


Fig.30. Acabado superficial de una estructura realizada en SU-8 sin usar filtro.

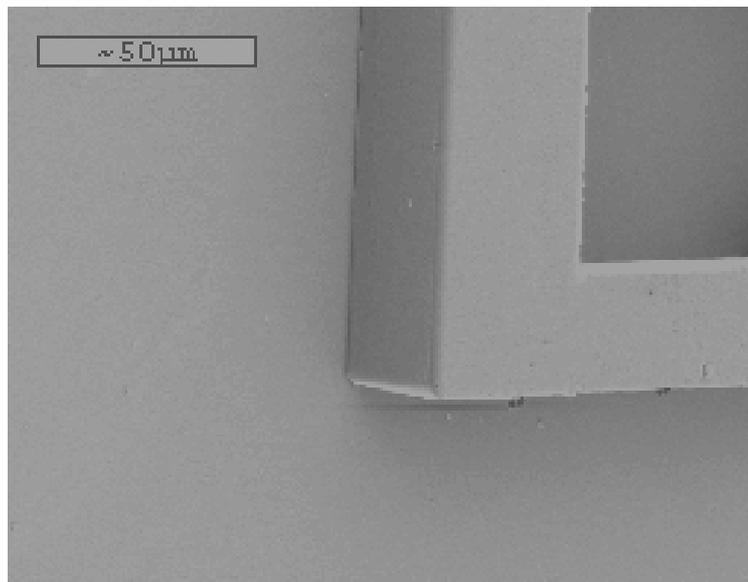


Fig.31. Acabado superficial de una estructura realizada en SU-8 usando filtro.

Otra razón para usar filtro, es evitar la contaminación de la superficie por agentes ambientales, efectos que luego son amplificados por el proceso. Se hace especialmente crítico cuando se dibuja con el orden de $1\ \mu\text{m}$ o menor.

g) Post Exposure Bake (PEB)

Durante este paso el SU-8 iluminado es polimerizado a través de un mecanismo de fotoampliación catiónica. La polimerización se puede llevar a cabo a temperatura ambiente, o bien a 95°C durante un tiempo que depende del espesor de la capa, para aumentar la velocidad del proceso. Sin embargo, 50°C puede ser

una temperatura aceptable si el tiempo de PEB se aumenta a una hora [18]. La principal ventaja de usar baja temperatura de PEB consiste en la consecución de tensiones térmicas residuales mucho menos importantes que en el caso de 95°C.

El PEB puede realizarse en hotplate o en horno, también es importante que la superficie sea muy plana y horizontal.

Después del PEB, el sustrato debe ser enfriado lentamente, sin aplicar choque térmico.

La temperatura de transición vítrea del SU-8 antes del PEB ronda los 55 °C [17]. La idea es producir un cierto polimerizado antes de llegar a la temperatura primaria de PEB que ronda los 90-95 °C, para prevenir que fluya.

La estrategia común es calentar 5 minutos a 65 °C y luego 15 minutos a 95 °C. No obstante el fabricante también ofrece una tabla en la que aconseja unos tiempos determinados en función del espesor de capa depositada, esta tabla se presenta a continuación.

THICKNESS microns	PEB TIME (65°C)* minutes	PEB TIME (95°C) minutes
100 - 150	5	10 - 12
160 - 225	5	12 - 15
230 - 270	5	15 - 20
280 - 550	5	20 - 30

h) Development

La forma estándar de hacerlo es hacer un grabado por inmersión a temperatura ambiente, pero también se usan otras técnicas tales como “spray development”.

El tiempo del grabado depende del espesor del layer. Dicho tiempo se puede encontrar en la hoja de características del fabricante. En la tabla siguiente se pueden ver los tiempos aconsejados por MicroChem para la serie SU-8 2100-2150.

THICKNESS	DEVELOPMENT TIME
microns	minutes
100 - 150	10 - 15
160 - 225	15 - 17
230 - 270	17 - 20
280 - 550	20 - 30

La sustancia que se usa para realizar el grabado se denomina PGMEA, propilenglicol metil eter acetona.

Después del grabado se procede a realizar un aclarado con IPA (Isopropanol).

i) Hardbake

El Hardbake es un paso opcional que consiste en someter a la estructura a una temperatura de 200 °C, durante un tiempo entre 5 y 30 minutos.

Hasta aquí el proceso típico de polimerización de la resina SU-8. Con este proceso es difícil realizar estructuras complejas, como por ejemplo canales cerrados u otro tipo de estructuras puesto que se trabaja con una sola capa. En el apartado siguiente se verán algunos procesos en los que se consiguen estructuras más complejas ya sea por aplicación de técnicas especiales o por la utilización de varias capas.

6.5. Estructuras en SU-8.

En este apartado, se obvian los pasos del proceso típico de fabricación en SU-8, pero se comentan detalles de algunos pasos de dicho proceso en el sentido de la forma de llevarlos a cabo, para conseguir formas y estructuras más complejas que las que se pueden realizar con el proceso típico, como pueden ser un simple cilindro o una red de canales.

6.5.1. Estructuras inclinadas.

La consecución de estructuras inclinadas se consigue jugando con la inclinación de la radiación ultravioleta, para lo cual es necesario tener un buen control de la inclinación del foco de luz. A continuación se presentan algunos ejemplos de estructuras inclinadas.

La siguiente figura se trata de un adaptador de fibra óptica realiza en SU-8 [26] mediante la técnica de exposición inclinada.

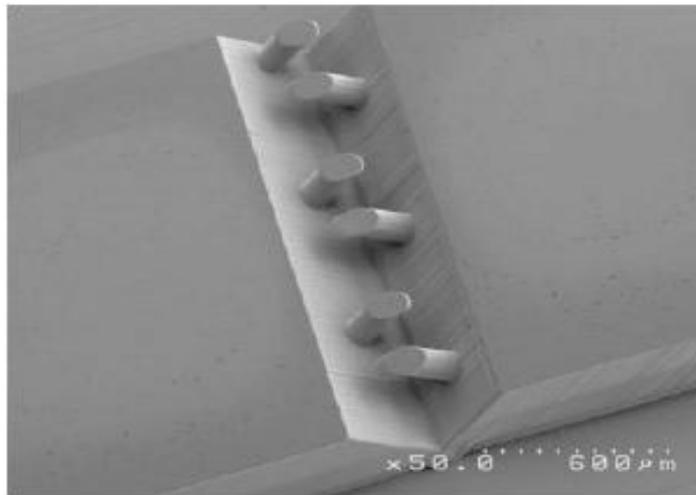


Fig. 10 The SEM image of a fiber holder having microcantilever as elastic microclips over a V-groove

Fig.32. Adaptador de fibra óptica realizado en SU-8 mediante exposición inclinada

Esta otra figura consiste en la realización de microagujas [27]. Podría mejorarse la geometría de estas agujas usando la exposición inclinada.



Fig.33. Realización de microagujas en SU-8

Para terminar se presenta una estructura en forma de malla, en la que se detalla gráficamente la forma de realizar dicha estructura [28]. La estructura consiste en un homogeneizador de flujo.

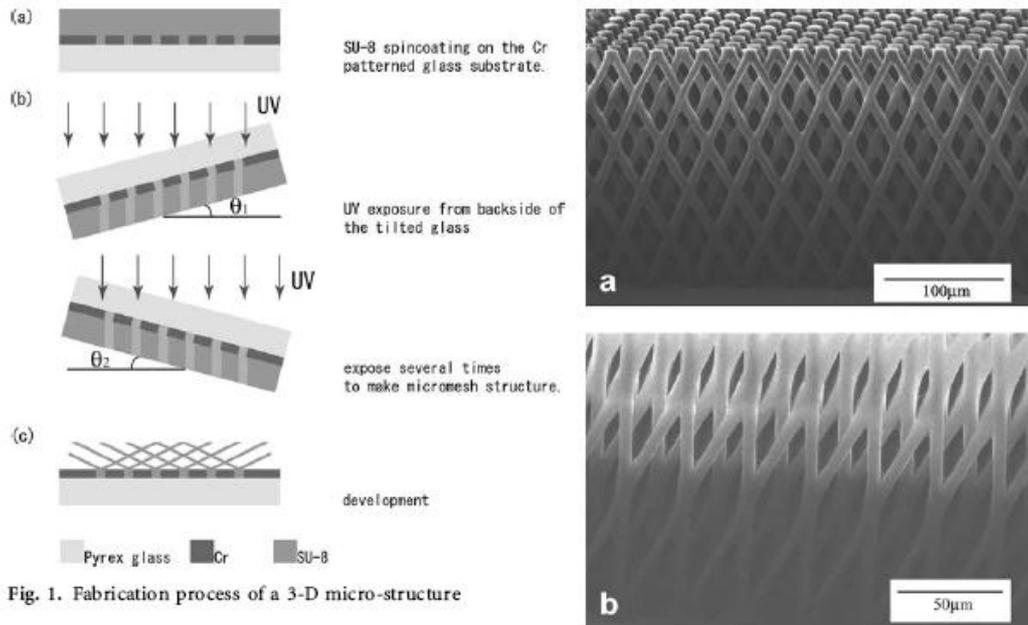


Fig.34. Realización de mallados en SU-8 mediante exposición inclinada.

6.5.2. Cavidades cónicas [26].

La realización de cavidades cónicas se consigue mediante la técnica de inclinación de la luz ultravioleta y la aplicación de un giro al sustrato. La siguiente figura es un ejemplo de ello.

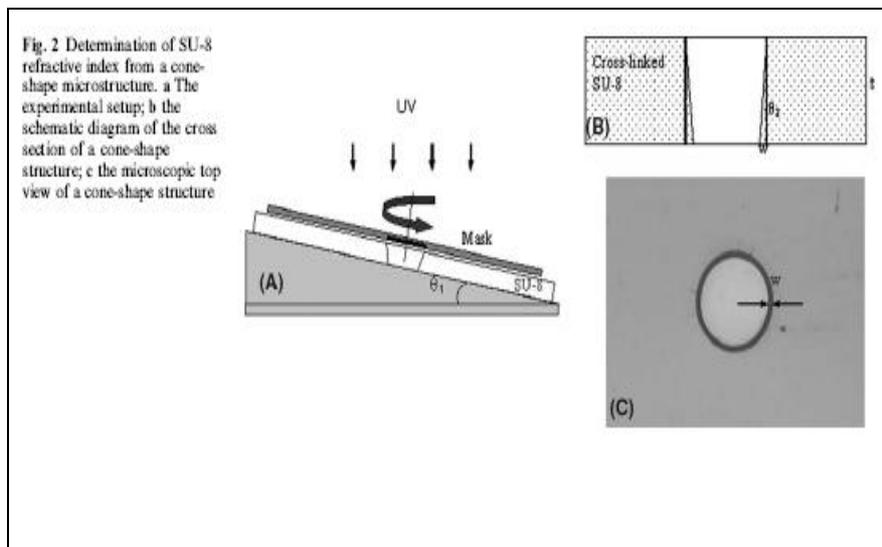


Fig.35. Realización de cavidades tronco-cónicas mediante exposición inclinada y giro del sustrato

6.5.3. Estructuras en forma de casquete esférico [29].

Mediante la técnica de inclinación se pueden conseguir casquetes esféricos como el de la ilustración que se muestra. Para ello, se deposita una resina positiva sobre la máscara, se calienta para que adopte forma curva. Luego se polimeriza y se ilumina como se indica en la figura.

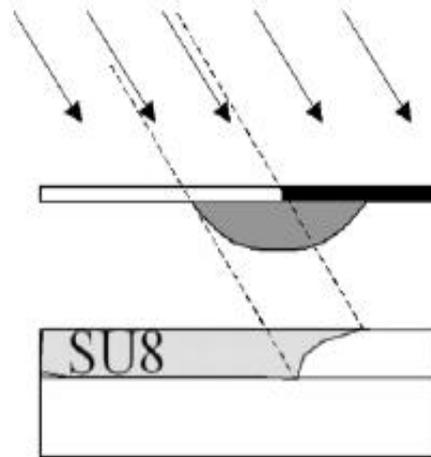


Fig. 3. Schematic illustration on the fabrication of curved structure on inclined surface

Fig.36. Realización de estructuras en forma de casquete esférico, y de estructuras con superficies curvas en SU-8 mediante exposición inclinada.

6.5.4. Técnica MultiExposure.

Esta técnica consiste en la multiexposición a los UV utilizando diferentes máscaras. Es una técnica en la que se debe tener un control muy preciso sobre la fuente de luz ultravioleta y el tiempo que se aplica. Dependiendo del tiempo de exposición se tendrá un espesor y otro, a más tiempo más espesor polimerizado.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de fabricación mediante multiexposición. La estructura es un inductor RF-MEMS en espiral [30].

Se presentarán otras dos maneras de hacerlo, una mediante la polimerización por capas y otra mediante la exposición a través de sustrato transparente.

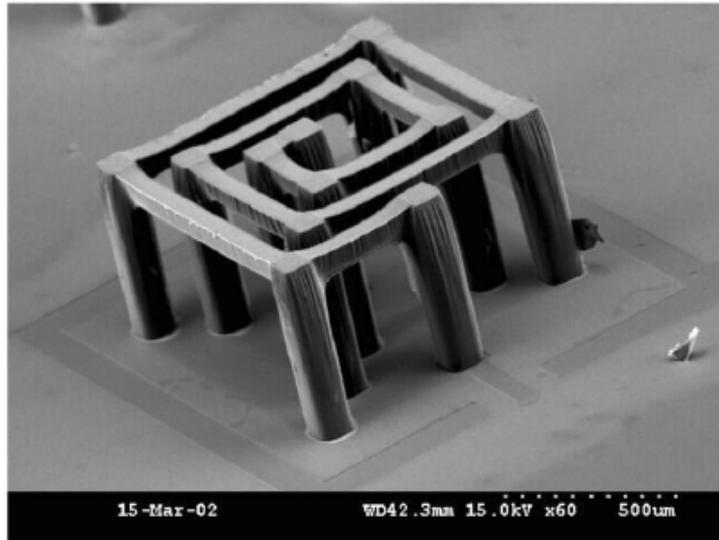


Fig.37. Bobina RF-MEMS fabricada por multiexposición

a) Multiexposición [30].

La multiexposición, en este caso, consta de dos pasos. Mediante el primer paso se realizarían las columnas de la estructura, polimerizando hasta llegar al sustrato utilizando la máscara adecuada. Y mediante el segundo paso, se realizaría la viga que une ambas columnas utilizando una exposición controlada hasta conseguir el espesor de viga deseado, y utilizando en este caso la máscara adecuada para ello.

b) Polimerización por capas (Multi-layer).

En este caso, se depositaría una capa de SU-8 de la altura de las columnas, y se aplicaría el proceso típico con la máscara oportuna hasta llegar al PEB, que no se debe hacer completo [22]. Posteriormente se deposita una capa del espesor de la viga que se quiera fabricar y se realiza todo el proceso típico. Tras el grabado se obtendría la estructura final. En este caso son necesarias dos capas, no así en el anterior ni en el siguiente que basta con una. Un ejemplo de proceso de fabricación multi-layer se puede encontrar en [22].

c) Exposición a través de sustrato transparente.

En este caso se hace una exposición por ambas caras de la oblea. Mediante una exposición por la cara inferior, atravesando el sustrato y llegando hasta la superficie superior se realizarían las columnas. Y mediante exposición controlada por la parte superior se fabricaría la viga.

6.5.5. Estructuras cónicas y tronco-cónicas [23].

En este apartado se muestra como se realizan estructuras cónicas y tronco-cónicas haciendo el paso de exposición por la cara de abajo del sustrato, atravesándolo.

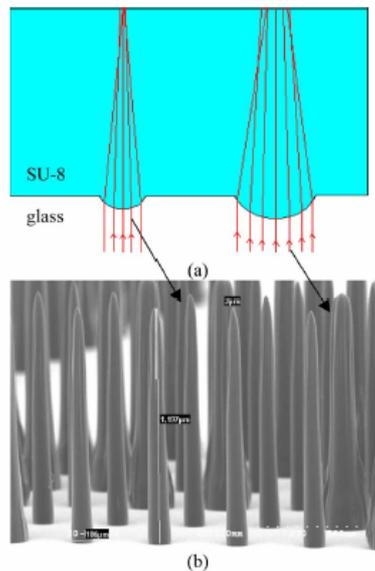


Fig.38. a) Dirección de los rayos UV al atravesar las lentes del sustrato para la realización de estructuras cónicas y tronco-cónicas. b) Estructuras cónicas y tronco-cónicas

La forma de hacerlo consta de la realización de lentes en la cara superior sustrato, de forma que si el foco de la lente cae fuera de la superficie superior de la capa de SU-8, se obtienen estructuras tronco-cónicas. En el caso de que el foco quede justo en la superficie o interior a la cara superior, la estructura que se obtienen son volúmenes cónicos.

6.5.6. Redes de microcanales enterrados.

Las redes de microcanales enterrados (microtuberías) se pueden realizar mediante las tres técnicas comentadas anteriormente, sin embargo existen otras que se comentan a continuación.

a) Laminación.

La laminación consiste en realizar una tapadera de SU-8 que posteriormente se soldará a la red de microcanales que inicialmente están abiertos. Para realizar la unión, se atacan las superficies a soldar con plasma de oxígeno para sensibilizarlas y mejorar la unión.

Posteriormente, aplicación presión y temperatura se termina de realizar la soldadura con la que queda terminada la red de microtuberías. El proceso completo de laminación se puede ver en detalle en [31]. A continuación se muestra la sección de un microcanal realizado con esta tecnología.

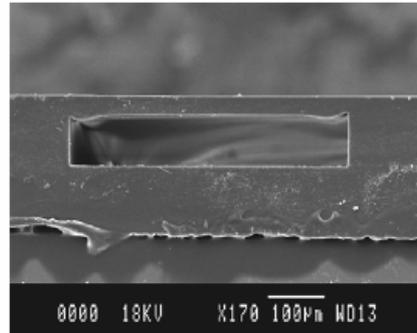


Fig.39. Sección de un microcanal realizado por laminación

b) Proceso de llenado.

El proceso de llenado consiste en, una vez realizados la red de microcanales, rellenar los canales de un material que posteriormente solidificará. Sobre este material se vuelve a realizar el proceso típico, y finalmente se elimina el material de relleno quedando los microcanales terminados [32]. A continuación se muestra la sección de un microcanal realizado por la técnica de llenado.

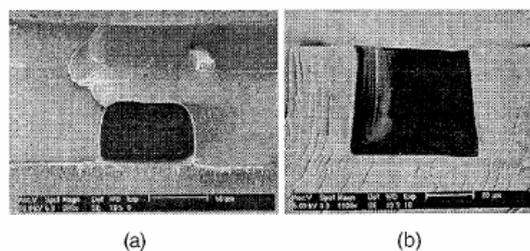


Fig.40. Sección de microcanales realizados por llenado.

c) Proceso de máscara (Mask process).

El proceso de máscara consiste en introducir una máscara de metal intermedia que se graba y queda justamente encima del canal para proteger la cavidad, que todavía no ha sido grabada, de un proceso de polimerizado posterior. Para más detalles ver [32]. En la siguiente figura se aprecia como queda la sección de unos microcanales realizados de esta forma.

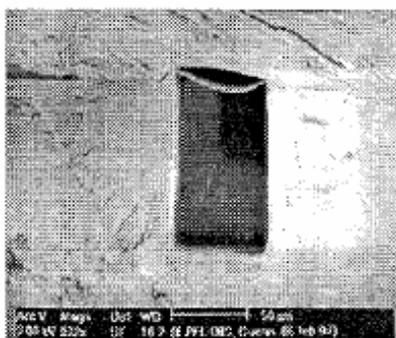


Fig.41. Sección de un microcanal realizado mediante mask process.

Para terminar, comentar que existe otra forma de realizar microcanales, consiste en la deposición de una fina capa de SU-8 que se usa como adhesivo sobre un sustrato que será usado como tapadera. Posteriormente, tanto la red de microcanales, como la fina capa de SU-8 son tratadas con plasma de oxígeno y soldadas mediante la aplicación de presión y temperatura. [31].

6.5.7. Membranas.

Las membranas son una estructura común en los microsistemas, ya sea en la fabricación de válvulas o de condensadores. La realización de membranas no aporta novedades en cuanto a proceso de fabricación, pero es interesante comentar que mediante SU-8 es posible realizar membranas de dimensiones considerables. Un ejemplo de estas membranas se pueden ver en la figura siguiente [33].

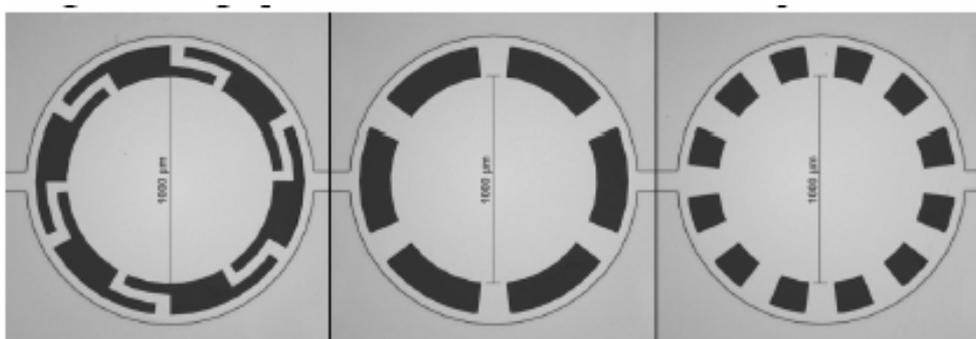


Fig.42. Membranas fabricadas en SU-8.

Estas membranas tienen un diámetro de 1000 micras y un espesor de menos de 10 micras.

6.5.8. Estructuras VHARM.

Las estructuras “very HARM”, es decir, las estructuras de muy alta relación de aspecto se realizan mediante el proceso típico. Sin embargo, es interesante comentar un efecto que sucede en la realización de este tipo de estructuras [23].

En la realización de cilindros con alta relación de aspecto, se obtienen diferentes configuraciones dependiendo del lado por el que se hace la exposición a los UV. La siguiente figura muestra dichas configuraciones.

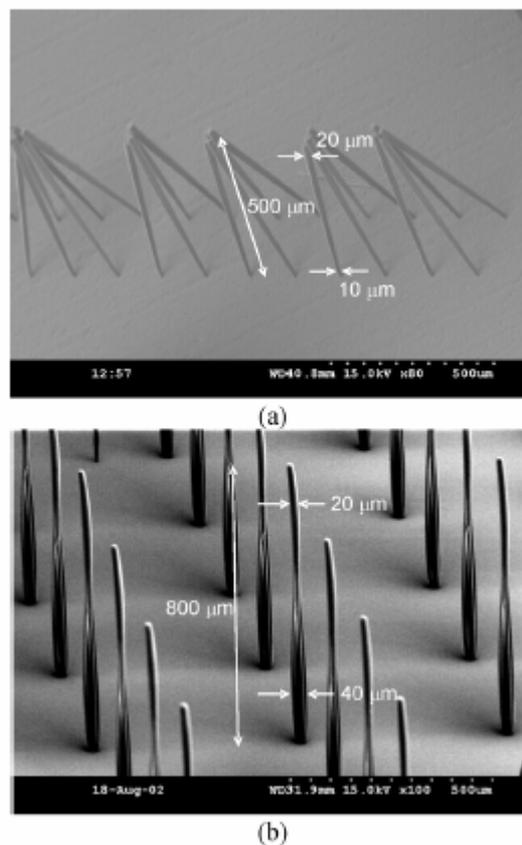


Fig.43. a) Estructuras VHARM realizadas mediante exposición por la cara superior. b) Estructuras VHARM realizadas mediante exposición por la cara inferior.

En el caso de la figura (a), la exposición se ha realizado de arriba hacia abajo, de forma que el diámetro de diseño de los cilindros es de 10 micras. Sin embargo, se observa que en la parte superior el diámetro es mayor que el de diseño, 20 micras. Esto se debe a que la parte superior absorbe más radiación que la inferior al estar más cerca del foco de luz. Para el caso (b), ocurre el fenómeno contrario puesto que la iluminación se ha realizado de abajo hacia arriba. Puede verse como en este caso la parte gruesa del cilindro, 40 micras, es la inferior mientras que el diámetro de diseño es 20 micras, correspondiente con la parte superior.

6.5.9. Estructuras con escala de grises [17].

La realización de estructuras utilizando una escala de grises permite hacer estructuras como la de la figura, en la que se observa la presencia de pendientes en las paredes. Es un proceso muy experimental del que todavía se tienen poco datos.

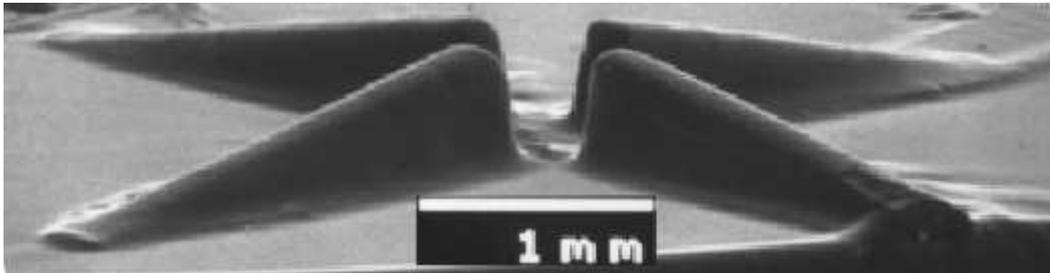


Fig.44. Estructura realizada en SU-8 mediante escala de grises.

6.5.10. Otras estructuras.

Existe la posibilidad de jugar con distintos ángulos de inclinación y obtener estructuras muy particulares. Si a la variación de tales ángulos se le añade el giro del sustrato es posible hacer estructuras bastante complejas. Ejemplos de todas ellas puede verse en detalle en [23].