

## 5. Materiales de fabricación

Los materiales para la fabricación de dispositivos son un importante aspecto a tener en cuenta puesto que de sus propiedades dependerá el buen funcionamiento del dispositivo. Se distinguirá en este apartado entre los materiales poliméricos y los no poliméricos. Empezará el estudio con materiales como el acero, el aluminio y el silicio, para posteriormente hacer un resumen de posibles polímeros a considerar como materiales de fabricación en el caso que nos ocupa.

### 5.1. Acero

El acero es un material ampliamente conocido en el mundo de la ingeniería. Se trata fundamentalmente de una aleación de hierro con carbono, siempre que el carbono no supere el 2% en peso.

Es un material que presenta interesantes propiedades para el mecanizado, es por ello que ha sido utilizado para la fabricación de nebulizadores.

Las principales propiedades del acero son:

- a) Temperatura de fusión: es un material con una temperatura de fusión genérica de alrededor de 1500 °C. Por tanto, salvando el problema de la dilatación por la temperatura es un material idóneo para trabajar con flow focusing a altas temperaturas.
- b) Es un material dúctil. Se pueden conseguir alambres o hilos de diámetros micrométricos, e incluso tubos con diámetros interior y exterior también micrométricos. Son estos tubos los utilizados en los múltiples de acero para introducir la resistencia fluídica necesaria para salvar la inestabilidad.
- c) Se trata de un material maleable, es decir, es posible conseguir láminas delgadas de este material con espesores del orden de los cientos de micras.
- d) Presenta una densidad media de 7850 Kg/m<sup>3</sup>. En principio esto no supone ni una ventaja ni un inconveniente puesto que los nebulizadores de acero, aún siendo los más grandes, tienen unas dimensiones tales que hacen que su peso no suponga un problema de traslado individual.
- e) Es un material tenaz, es decir, presenta oposición a ser deformado y roto. Supone un aspecto importante a tener en cuenta puesto que este hecho supone una ventaja en el traslado y manipulación de nebulizadores.

- f) El acero es un material elástico. Es decir, mientras que las deformaciones producidas por cargas hagan que este material esté en el dominio elástico, el acero se recupera a sus dimensiones originales. Por tanto, el nebulizador, en caso de estar sometido a ese rango de cargas no variará sus dimensiones al eliminar dichas cargas.

## **5.2. Aluminio**

El aluminio es otro de los materiales que se barajan a la hora de la elección de un material para un dispositivo flow focusing. Comparte propiedades con el aluminio puesto que se trata de un material, dúctil, maleable y tenaz, y también tiene comportamiento elástico bajo cargas. Sin embargo, existen diferencias.

Aún siendo el aluminio tenaz, no lo es tanto como el acero, es más deformable y presenta menos resistencia a ser rayado. Estas propiedades afectan negativamente a la elección del aluminio como material para realizar nebulizadores, puesto que es más sensible que el acero a mantener sus dimensiones. Otra diferencia entre el acero y el aluminio es su temperatura de fusión, que en el caso del aluminio es de 660°C, mucho menor que la del acero, aunque esto no supone en principio una desventaja.

El aluminio también presenta ventajas sobre el acero como es el hecho del reciclaje, el aluminio es un material reciclable, además es más barato que el acero y mucho más ligero, con una densidad de 2700Kg/m<sup>3</sup>.

## **5.3. Silicio**

El silicio supone una buena opción como alternativa en la realización de nebulizadores por ser un material cuyo mecanizado por técnicas microelectrónicas está bastante avanzado, así como por la ventaja anteriormente comentada de este tipo de técnica de fabricación. Como material, presenta unas propiedades muy diferentes a la del acero y el aluminio.

Con el aluminio comparte el bajo peso, siendo aún más ligero que éste, puesto que su densidad es de 2330kg/m<sup>3</sup>. Con el acero comparte la alta temperatura de fusión, alrededor de los 1500°C. Estas propiedades son buenas para cierto tipo de aplicaciones como las de alta temperatura y aquellas que requieran bajo peso. Sin embargo, es un material muy frágil, perdiéndose por tanto, en este caso, las propiedades de maleabilidad y ductilidad que se tenían en los casos anteriores. Además, es poco tenaz lo que supone un problema de posibles roturas en el transporte y manipulación de

nebulizadores. Por tanto, este tipo de nebulizador debe tener una protección, esta protección coincide con el adaptador, que es de plástico. Por tanto, el problema de la rotura se suaviza una vez está montado.

En los nebulizadores de silicio, es necesario tener en cuenta las propiedades del óxido de silicio porque es el material que se usa para realizar el bonding. Por ejemplo, el silicio aguanta mucho más el HF que el óxido de silicio, habría que tener en cuenta la utilización del óxido de silicio en presencia de algunos ácidos.

Para evitar la presencia del óxido de silicio podrían combinarse obleas de silicio con obleas de pirex, sin embargo, la oblea de pirex sólo se podría utilizar para realizar los canales de distribución de los dispositivos múltiples puesto que de utilizarlo para formar otras estructuras se podría producir el desvío del chorro debido a la posible presencia de cargas electrostáticas en su superficie.

#### **5.4. Polímeros**

La definición de polímero según la Real Academia Española es:

“Compuesto químico, natural o sintético, formado por polimerización y que consiste esencialmente en unidades estructurales repetidas”.

Las unidades estructurales a que se refiere la definición son las unidades básicas, también llamadas monómeros, que generalmente son moléculas de bajo peso molecular. Los materiales poliméricos han emergido recientemente en la tecnología MEMS por tener unas propiedades interesantes que pasaremos a ver a continuación.

Son materiales con muy bajo punto de transición vítrea ( $T_g$ ) si se los compara con los puntos de fusión de los comentados anteriormente. Debemos aclarar algo en este punto. La transición vítrea no es lo mismo que el fundido. El fundido es una transición que se manifiesta en los polímeros cristalinos y semicristalinos. Ocurre cuando las cadenas poliméricas abandonan sus estructuras cristalinas y se transforman en un líquido desordenado. La transición vítrea es una transición que se manifiesta en los polímeros semicristalinos y amorfos; es decir, polímeros cuyas cadenas no están dispuestas según un ordenamiento cristalino, sino que están esparcidas en cualquier ordenamiento, aún en estado sólido. Si el polímero es cristalino sólo tiene temperatura de fusión, y si es amorfo sólo tiene temperatura de transición vítrea, aunque es conveniente decir que es prácticamente imposible encontrar un polímero cristalino puro. La temperatura de transición vítrea es un valor de extrema importancia en ingeniería de polímeros, pues

indica la temperatura de trabajo del plástico y por ende determina si un determinado plástico puede ser utilizado para una aplicación dada. Dicha temperatura es en general menor que 100 °C.

La ventaja de los polímeros reside en:

- a) El bajo coste.
- b) La baja densidad, inferior a la del silicio.
- c) En el caso de los termoplásticos, existe la posibilidad de un “reciclado”, es decir, es posible volver a ablandarlo mediante calor, y posteriormente enfriarlo para volver a hacer un producto acabado.
- d) Fácil y variada realización de dispositivos. Se pueden realizar dispositivos mediante técnicas convencionales de mecanizado, como por ejemplo fresado, taladrado, etc. También se pueden realizar dispositivos mediante extrusión, moldeo, etc. Y para terminar, es posible realizar dispositivos poliméricos mediante técnicas fotolitográficas.

Los inconvenientes son:

- a) Baja temperatura de transición vítrea. Si la temperatura de trabajo del dispositivo está por debajo de esta temperatura de transición vítrea no debe aparecer ningún problema de reblandecimiento.
- b) En el caso de los polímeros es más importante prestar especial atención al tipo de fluidos que serán utilizados para el trabajo y para la limpieza. En este caso, la utilización de disolventes orgánicos puede ser crítica, puesto que en mayor o menor medida afecta a los dispositivos pudiendo llegar a destruirlos. En este punto, los materiales estudiados anteriormente superan ampliamente a los polímeros.

A continuación se estudian algunos de los materiales poliméricos utilizados en microsistemas, como son el PDMS, el PMMA, algunas resinas positivas y el recientemente descubierto para la tecnología MEMS, LF55GN.

#### **5.4.1 Polidimetilsiloxano, PDMS.**

El PDMS es un polímero ampliamente usado en MEMS para la realización de microsistemas fluidicos. Se trata de un polímero de baja densidad,  $0.97 \text{ kg/m}^3$ , y bajo módulo de Young (360 – 870 KPa). Presenta interesantes propiedades para la realización de dispositivos flow focusing como son su hidrofobicidad y biocompatibilidad, además presenta una muy buena adhesión al dióxido de silicio.

Puede ser tratado de varias formas, mediante grabado húmedo y mediante grabado por plasma para obtener formas determinadas. También se usa el moldeo, mediante el cual se realiza un molde en silicio para posteriormente llenarlo con PDMS. Finalmente se retira el molde tras un tratamiento, y se obtiene la estructura de PDMS, también conocido este método como “soft lithography”. Existen trabajos sobre la utilización de PDMS sensible al ultravioleta pero aún están en fase de desarrollo [15].

El inconveniente de la utilización de PDMS radica principalmente en dichos procesos de fabricación, puesto que tanto los grabados húmedos y mediante plasma hay que realizarlos con máquinas muy especializadas de alto coste. En el caso de la realización del molde de silicio se tiene el mismo problema, puesto que para realizar la estructura en silicio es necesaria la utilización de tales máquinas, aunque se está usando cada vez más el SU-8 como sustituto del silicio para estas tareas. Además, para la realización de estructuras fluidicas, como microcanales, el PDMS presenta el inconveniente adicional de su baja rigidez y por tanto, la posible deformación debida a la fuerza que ejerce el fluido sobre las paredes. Tal inconveniente se salva con el uso de SU-8, un polímero de mayor rigidez que el anterior.

#### **5.4.2 Polimetilmetacrilato, PMMA**

El PMMA es otro de los polímeros más utilizados en la fabricación de dispositivos en MEMS. Mediante la técnica LIGA, usando radiaciones de rayos-X es posible realizar estructuras VHARM (Very High Aspect Ratio Micromachines) con relaciones de aspecto superior a 100 y con espesores de varios milímetros [16].

El hecho de poder realizar estructura VHARM es de especial interés para la tecnología flow focusing, puesto que podría llegarse a estudiar la posibilidad de realizar un dispositivo múltiple sin la estructura adicional de pérdida de carga, en cuyo caso, tal

pérdida de carga podría ser incluida en la longitud de los cilindros. Además es transparente, lo que facilita la observación experimental del flujo por los microcanales.

El PMMA, igual que el PDMS requiere un proceso de fabricación exigente en cuanto al coste de la maquinaria necesaria. Es éste un inconveniente limitante a la hora de realizar dispositivos de bajo coste. Aunque dicho sea de paso, los dispositivos realizados en PMMA también pueden realizarse mediante técnicas convencionales de mecanizado, al igual que otros polímeros. Sin embargo, las dimensiones requeridas exigen precisiones de fabricación muy altas, y la generación de rebabas se convierte en un problema que afecta precisamente a la definición de formas y a las tolerancias de fabricación.

### **5.4.3. Resinas**

Además de los polímeros indicados anteriormente, existen otros materiales de fabricación para la consecución de estructuras de espesores y relaciones de aspecto grandes. Estos materiales son resinas positivas tales como la AZ-4562, AZ-9260, y la fotorresina negativa JSR THB-430N.

Estas resinas presentan una fácil eliminación del sustrato, sin embargo en su proceso de fabricación los espesores conseguidos mediante un solo paso de deposición haciendo spin-coating es de apenas unas 100 micras. Este problema puede ser salvado mediante la realización de sucesivas etapas de deposición, por ejemplo para el caso de la JSR THB-430N pueden llegarse a espesores de 1.5 mm, con relaciones de aspecto de 5. Sin embargo, la resolución final conseguida es mala y la calidad de las paredes fabricadas bastante pobre [16].

### **5.4.4. LF55GN**

LF55GN se trata de una fotorresina negativa, comercializada por MacDermid y cuyo origen fue la realización de flexographic printing plates. La primera publicación relativa a su relación con la tecnología MEMS en estructuras de alta relación de aspecto data de 2007 [16].

Mediante esta resina es posible la realización de estructuras con espesores superiores a 4 mm y relaciones de aspecto superiores a 27. A parte de esta interesante propiedad cabe decir que su proceso de fabricación es muy simple. Se trata de una resina sensible a la radiación UV, cuyo tiempo de exposición es función de los espesores tratados, pero este

tiempo aun para espesores altos es muy pequeño, menor a 2 min, también bajos tiempos de revelado, menores a 4 min. No necesita pasos de prebake, es muy flexible, con un módulo de Young de 700KPa, y tiene además un importante aspecto económico en la utilización del developer, puesto que este caso se trata de agua. Sin embargo, tiene el inconveniente de la gran sensibilidad a disolventes orgánicos del tipo del tolueno o la acetona, así como su poca utilización hasta ahora en la realización de microsistemas debido a su reciente aparición. No obstante es una alternativa muy interesante a tener en cuenta para la realización de futuros trabajos en tecnología MEMS.