

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de
Telecomunicación

Actuador térmico de burbuja para movimiento de
muestras líquidas

Autor: José María Valverde Carmona

Tutor: Francisco Antonio Perdigones Sánchez

**Departamento de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación

Actuador térmico de burbuja para movimiento de muestras líquidas

Autor:

José María Valverde Carmona

Tutor:

Francisco Antonio Perdigones Sánchez

Profesor Ayudante Doctor

Departamento de Ingeniería Electrónica

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Proyecto Fin de Carrera: Actuador térmico de burbuja para movimiento de muestras líquidas

Autor: José María Valverde Carmona

Tutor: Francisco Antonio Perdigones
Sánchez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

A mi familia
A mis amigos
A mis maestros

Agradecimientos

La realización de este proyecto supone la finalización de una etapa de mi vida que he vivido intensamente y de la que me llevo grandes momentos. Ha significado mi primera andadura en el mundo de las Telecomunicaciones, con el que espero estar ligado siempre.

Agradecer en primer lugar a mis padres, Cristóbal y Leo, el gran apoyo y cariño recibido durante todos estos años. Gracias por haber confiado en mí siempre, a pesar del largo camino y los grandes obstáculos que hay que afrontar para estudiar una Ingeniería y por hacer el esfuerzo económico que me ha permitido llegar hasta aquí. Sin vosotros no habría sido posible, esto es vuestro.

Gracias a Araceli por ser esa luz que me ha iluminado cuando todo estaba oscuro, por apoyarme en todas las decisiones que he tomado y por ayudarme a levantarme cada vez que he tropezado. Sin tu apoyo no habría sido capaz de llegar hasta aquí.

No puedo olvidarme de todos mis amigos que he conocido en la carrera, ellos han hecho que los días en la Escuela se hiciesen más amenos. Me llevo grandes amigos que espero tener toda mi vida.

Por último, agradecer a mi tutor del proyecto, Francisco Perdigones, la ayuda que me ha brindado desde el primer día. Hacen falta más profesores como tú, tan comprometidos y enamorados de su trabajo.

José María Valverde Carmona

Sevilla, 2017

Resumen

El propósito principal del proyecto es el diseño y la fabricación de un actuador térmico de burbuja para el movimiento de muestras líquidas. Para ello se hace uso de una microbomba accionada por burbuja térmica generada por la transición de líquido a vapor. A grandes rasgos, la microbomba se compone de un calentador resistivo, un par de toberas encargadas de controlar el flujo de fluido y una cámara donde se forma la burbuja. El mecanismo de actuación se basa en la expansión y el colapso periódico de la burbuja que genera un flujo neto hacia una dirección.

En la fabricación del dispositivo se han empleado materiales de bajo coste y con tecnologías de producción masiva. La parte microfluídica se ha fabricado con la técnica de estampado de precisión en caliente, o más conocida como *hot embossing*, con las ventajas que esta presenta.

Tras la realización de diferentes experimentos, se consigue un caudal máximo de 4,05 $\mu\text{l}/\text{min}$ cuando se estimula el sistema con una señal cuadrada de 50 mHz con un ciclo de trabajo del 50 % bajo un consumo de energía medio de 4,7 W.

Abstract

The main aim of this project is the design and the fabrication of a thermal-bubble-actuated for the movement of liquid samples. To this end, use is made of a micropump actuated by thermal-bubble generated by the transition from liquid to vapour. Broadly, the micropump consists of a resistive heater, a pair of nozzle-diffuser flow controller and a chamber where the bubble is formed. The actuation mechanism comes from periodically nucleating and collapsing thermal bubble which generates a net flow in one direction.

In the fabrication process of the device have been used low-cost materials with technology of mass production. The microfluidic part has been produced by the hot embossing technique, with all the advantages it offers.

Following the completion of different experiments, is achieved a maximum volume flow rate when the system is excited with a square signal of 50 mHz, duty cycle of 50 % and average power consumption of 4.7 W.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
1 Introducción y objetivos	1
1.1 <i>Objetivos</i>	3
1.2 <i>Estructura de la memoria</i>	3
2 Estado del arte	7
2.1 <i>Microbombas</i>	7
2.1.1 Electrostática	8
2.1.2 Piezoeléctrica	11
2.1.3 Termoneumática	12
2.1.4 Electromagnética	12
2.1.5 Magnetohidrodinámica	13
2.1.6 Electrohidrodinámica	14
2.1.7 Electroosmótica	15
2.1.8 De burbuja	17
2.2 <i>Procesos de fabricación</i>	17
2.2.1 Grabado y litografía	18
2.2.2 Tecnologías de micromecanizado	23
2.2.3 LIGA	25
2.2.4 Técnicas de replicación	26
2.2.5 PCB-MEMS	28
2.2.6 PDMS y SU-8	28
3 Diseño conceptual y materiales	33
3.1 <i>Diseño conceptual de la microbomba</i>	33
3.2 <i>Principios fundamentales</i>	34
3.2.1 Ley de Charles	34
3.2.2 Efecto Joule	35
3.3 <i>Materiales y líquidos empleados</i>	35
3.3.1 Metacrilato PMMA	36
3.3.2 Poliestireno (<i>styroglass</i>)	36
3.3.3 Elección de material y líquido	37
4 Proceso de fabricación	39
4.1 <i>Diseño y fabricación de máscaras</i>	39
4.1.1 Diseño máscara estructura microfluídica	39
4.1.2 Diseño máscara calentador	40
4.1.3 Fabricación de máscaras	41

4.2	<i>Fabricación de calentadores de cobre</i>	43
4.3	<i>Fabricación del dispositivo microfluídico mediante hot embossing</i>	46
4.3.1	Fabricación del molde de PCB	46
4.3.2	Hot embossing	47
4.4	<i>Pegado del PCB con el circuito microfluídico</i>	49
5	Caracterización previa de parámetros funcionales	53
5.1	<i>Caracterización de los calentadores</i>	53
5.1.1	Calentador de 150 μm	53
5.1.2	Calentador de 100 μm	54
5.2	<i>Parámetros para la generación de la burbuja</i>	56
6	Circuito electrónico	58
6.1	<i>Diseño del circuito</i>	58
6.2	<i>Simulación en Micro-Cap</i>	60
6.3	<i>Elección de componentes</i>	62
6.4	<i>Montaje en placa de pruebas</i>	63
6.5	<i>Fabricación del circuito electrónico en PCB</i>	65
6.5.1	Esquemático	65
6.5.2	Layout	66
6.5.3	Construcción del PCB	67
7	Montaje experimental y resultados	71
7.1	<i>Montaje experimental y procedimiento</i>	71
7.2	<i>Resultados experimentales</i>	73
8	Conclusiones y líneas futuras	79
8.1	<i>Conclusiones</i>	79
8.2	<i>Líneas futuras</i>	79
	Referencias	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Comparativa entre grabado húmedo y seco	22
Tabla 5-1. Temperatura en función de la corriente (pistas de 150 μm)	54
Tabla 5-2. Temperatura en función de la corriente (pistas de 100 μm)	55
Tabla 7-1. Señales generadas	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Microestructura para microfluidos	1
Figura 2-1. Esquemático del elemento nozzle-diffuser	8
Figura 2-3. Clasificación de microbombas con diferentes métodos de actuación	10
Figura 2-4. Microbomba piezoeléctrica en configuración de deformación lateral	11
Figura 2-5. Esquemático de una microbomba termoneumática	12
Figura 2-6. Esquemático de una microbomba electromagnética	13
Figura 2-7. Vista superior y transversal de una microbomba electrodinámica	14
Figura 2-8. Microbomba electrohidrodinámica (inducción)	15
Figura 2-9. Electroquímica de una nterfaz sólido-líquido y flujo electroosmótico	16
Figura 2-10. Microbomba de tipo burbuja	17
Figura 2-11. Proceso de fabricación general de un microsistema	18
Figura 2-12. Esquema del proceso general de grabado y litografía	19
Figura 2-13. Método substractivo y aditivo de transferencia de diseños	19
Figura 2-14. Perfil de grabado isótropo, anisótropo y completamente anisótropo	20
Figura 2-15. Proceso básico de grabado	21
Figura 2-16. Microturbina fabricada por <i>ion-etching silicon</i>	22
Figura 2-17. Proceso básico de micromecanizado en superficie	24
Figura 2-18. Proceso de micromecanizado de volumen	25
Figura 2-19. Pasos básicos del proceso LIGA	26
Figura 2-20. Proceso de replicado de elementos mediante <i>injection moulding</i>	27
Figura 2-21. Fabricación mediante <i>hot embossing</i>	27
Figura 2-22. Estructura de PDMS con dispositivos de calentamiento y detección	29
Figura 2-23. Adaptador de fibra óptica realizado con SU-8	30
Figura 3-1. Vista superior del principio de expansión y colapso de la burbuja	33
Figura 3-2. Esquemático de la microbomba con el calentador	33
Figura 3-3. Relación entre presión y volumen	34
Figura 3-4. Relación entre volumen y temperatura	34
Figura 3-5. Metacrilato antes de ser expuesto a vapor de IPA y después	37
Figura 4-1. Estructura microfluídica	39
Figura 4-2. Detalle tobera de salida	40
Figura 4-3. Detalle tobera de entrada	40
Figura 4-4. Calentador de 150 μm de ancho de pista y separación entre ellas	40
Figura 4-5. Calentador de 100 μm de ancho de pista y separación entre ellas	41
Figura 4-6. Superposición del calentador y circuito microfluídico	41

Figura 4-7. Photoplotter utilizado en la fabricación de máscaras	42
Figura 4-8. Conversión de .gds a .fpf	42
Figura 4-9. Resultado de la fabricación de la máscara de los calentadores	43
Figura 4-10. Resultado de la fabricación de la máscara del circuito microfluídico	43
Figura 4-11. Alineadora de máscaras	44
Figura 4-12. Fases para la fabricación de PCBs	44
Figura 4-13. Calentador de 100 μm	45
Figura 4-14. Calentador de 150 μm	45
Figura 4-15. Detalle del PCB con un cable de 360 μm de diámetro	45
Figura 4-16. Molde de PCB	47
Figura 4-17. Detalle molde de PCB cn cable de 360 μm de diámetro	47
Figura 4-18. Temperaturas máquina <i>hot embossing</i>	48
Figura 4-19. Poliestireno colocado sobre el molde PCB en la prensa	48
Figura 4-20. Fuerza aplicada por la prensa	49
Figura 4-21. Circuito microfluídico	49
Figura 4-22. Pegamento epoxy EPO-TEK 301B	50
Figura 4-23. Cámara de vacío	50
Figura 4-24. Pieza de poliestireno pegada sobre el PCB	51
Figura 5-1. Gráfica de la temperatura en función de la corriente (pistas de 150 μm)	54
Figura 5-2. Gráfica de la temperatura en función de la corriente (pistas de 100 μm)	55
Figura 5-3. Gráfica combinada del calentador de 150 μm y 100 μm	55
Figura 5-4. Aparición de la burbuja	56
Figura 6-1. Circuito electrónico	58
Figura 6-2. Simplificación en saturación	59
Figura 6-3. Simplificación en corte	59
Figura 6-4. Señal cuadrada de entrada	61
Figura 6-5. Corriente que circula por el calentador	61
Figura 6-6. Resistencias de tipo tiza	62
Figura 6-7. Transistor MOSFET IRFB4227	62
Figura 6-8. Driver MOSFET TC4427	63
Figura 6-9. <i>Pinout</i> del driver y transistor	63
Figura 6-10. Señal de entrada	64
Figura 6-11. Montaje en placa de prueba	64
Figura 6-12. Prueba de funcionamiento	64
Figura 6-13. Esquemático del circuito en Eagle	65
Figura 6-14. <i>Layout</i> del circuito	66
Figura 6-15. Máscara del circuito electrónico	67
Figura 6-16. Insoladora rayos UV	68
Figura 6-17. Circuito electrónico conectado a la microbomba	69

Figura 7-1. Pie de rey digital	71
Figura 7-2. Pipeta automática	72
Figura 7-3. Montaje experimental	73
Figura 7-4. Vista transversal del dispositivo microfluídico	73
Figura 7-5- Altura de conos	74
Figura 7-6. Volumen cono	74
Figura 7-7. Bombeo con una señal de 50 mHz y 50 % de <i>duty cycle</i>	76

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

We used to think that if we knew one, we knew two, because one and one are two. We are finding that we must learn a great deal more about 'and'.

- Arthur Stanley Eddington-

A lo largo de la historia el ser humano ha intentado mejorar sus condiciones de vida a través del conocimiento, lo que ha logrado gracias al desarrollo de la ciencia y la tecnología. A pesar de los importantes avances en ingeniería aún son muchos los retos que quedan por superar, especialmente en un sector tan importante como el de la salud. Se requieren, por ejemplo, de pruebas de diagnóstico médico portátiles y de bajo costo, microsistemas rápidos de análisis químico y biológico, así como dispositivos de administración controlada de fármacos.

Para el logro de estas aplicaciones es necesario desarrollar microbombas innovadoras que permitan controlar el suministro de fármacos y la interacción de fluidos químicos y biológicos. Una tecnología adecuada para este desarrollo es la de los sistemas microelectromecánicos (MEMS), con la cual se pueden fabricar dispositivos muy pequeños, portátiles, con un bajo consumo de energía, de respuesta rápida y a un costo reducido. Las microbombas tienen gran cantidad de aplicaciones en dispositivos MEMS, tales como el manejo y precisión de pequeños volúmenes de fluidos en sistemas químicos, biológicos o médicos.

Por otra parte, la microfluídica promete ser el segmento más dinámico del impulso que tienen los MEMS como lo demuestra el creciente número de publicaciones que versan sobre los microfluidos. Agrupa un gran número de ramas de la física, desde la dinámica de fluidos hasta la electrónica, y está estrechamente ligada a las ciencias biológicas. En los últimos años, con el desarrollo de la biotecnología, la microelectrónica y la ciencia de materiales, entre otros, el uso de dispositivos microfluídicos ha ido incrementándose.

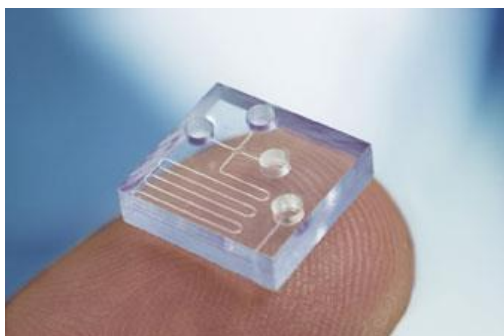


Figura 1-1. Microestructura para microfluidos

La microfluídica es una ciencia y tecnología en la que se procesan o manipulan cantidades menores a los microlitros usando canales con dimensiones menores de 1 mm. Los microfluidos tienden a tener un comportamiento de flujo laminar y ofrecen la capacidad de controlar la concentración de las moléculas en el espacio y el tiempo. Como tecnología, los microfluidos ofrecen una gran cantidad de ventajas y muy pocas desventajas, sin embargo, aún no se convierten en una tecnología ampliamente utilizada.

La naturaleza se comporta de forma diferente según el tamaño. El comportamiento de los fluidos en la microescala difiere sustancialmente de lo observado en la macroescala. Al cambiar las escalas cambia el comportamiento de los sistemas y aunque la física clásica sigue siendo válida, el comportamiento de los objetos microscópicos difiere del de los macroscópicos. La importancia relativa de las distintas fuerzas cambia al reducir la escala; aumentan la tensión superficial, la viscosidad y las fuerzas electrostáticas, y se vuelven insignificantes la fuerza de la gravedad y la inercia. En microcanales de 10 a 500 nanómetros de diámetro el número de Reynolds es extremadamente bajo; típicamente es de tan solo unas décimas. Por lo tanto, el fluido es siempre laminar y no ocurren turbulencias; sólo la difusión interviene en la mezcla de fluidos. Debido a la alta tensión superficial, la reacción química en un microfluido se ve muy acelerada. En la actualidad existen diversos dispositivos comerciales que hacen uso de microfluidos, como los laboratorios en un chip (*lab-on-a-chip*).

El uso de dispositivos para microfluidos en la investigación biomédica y clínica tiene un significativo número de ventajas debido al pequeño volumen de fluido en los canales, llegando incluso a emplearse nanolitros. Es de gran utilidad cuando los reactivos son muy caros ya que la cantidad de reactivos empleados es muy baja. Además, las técnicas de fabricación empleadas en la construcción de estos microdispositivos son relativamente baratas y razonables a pesar de que son altamente elaboradas y de que permiten su producción en masa. De forma similar a la microelectrónica, la tecnología de los microfluidos permite la fabricación de dispositivos integrados o que reúnen diferentes funciones en el mismo chip.

Los microfluidos han permitido explotar ciertas diferencias fundamentales entre las propiedades físicas de los fluidos que se mueven por grandes canales y aquellos que lo hacen por microcanales. Una de las más importantes es la turbulencia (la cual está ausente en el flujo laminar). A gran escala, los fluidos se mezclan convectivamente. Esto muestra que en los fluidos macroscópicos la inercia es más importante que la viscosidad, en el caso de los microfluidos, estos no se mezclan convectivamente, cuando dos corrientes de fluidos fluyen por un microcanal lo hacen en paralelo, sin turbulencia, y el mezclado solo es consecuencia de la difusión de las moléculas entre la interfase de los fluidos. El anterior tipo de flujo descrito es llamado laminar. También se han desarrollado micromezcladores los cuales se emplean en el caso de que el microproceso lo requiera.

Una característica muy útil de los microfluidos es el flujo electroosmótico. Cuando un microfluido que contiene iones (como el agua) se coloca en un microcanal que tiene cargas fijas en su superficie (tal como dióxido de silicio u óxidos de PDMS) y se aplica un potencial eléctrico a lo largo de los canales, el fluido se mueve como un tapón, más que como un flujo parabólico (que es el perfil observado cuando solo se aplica presión al fluido). El flujo electroosmótico minimiza el ensanchamiento de tapones en la muestra, lo cual ocurre cuando se emplean muchos equipos para aplicar presión y permite una mejor resolución de las especies.

Hay dos métodos comunes por los que se logra que un fluido avance por un microcanal. Uno de ellos emplea presión para la conducción del flujo, por medio de este método el microfluido es bombeado a través del dispositivo usando bombas de desplazamiento positivo, tales como jeringas de bombeo. Cuando se emplea este método para el bombeo de microfluidos, se produce un perfil de velocidad parabólico dentro del canal, y se considera que la velocidad del fluido cerca de las paredes del

microcanal es cero y en su parte central es máxima. El uso de la presión para el bombeo es relativamente barato y reproducible. Actualmente se están desarrollando microbombas, por lo que el uso de esta técnica también tiende a la miniaturización.

Otro método común para el bombeo de microfluidos es el bombeo electroosmótico. Si las paredes de un microcanal tienen una carga eléctrica, entonces se formará una capa eléctrica doble. Cuando un campo eléctrico es aplicado a través del microcanal, los iones de la doble capa se mueven hacia el electrodo de polaridad de signo contrario. Esto crea un movimiento del fluido que está cercano a las paredes y se transfiere al resto del fluido debido a las fuerzas viscosas dentro del fluido. Si el microcanal está abierto, el perfil de velocidad es uniforme a lo largo del canal. Sin embargo, si el campo eléctrico es aplicado a lo largo de un canal cerrado (o si se está aplicando presión con una bomba) se forma un patrón de recirculación, en el que el fluido que se mueve por el centro del canal se mueve en una dirección contraria a la del fluido de las paredes. En los canales cerrados, la velocidad a lo largo del centro del microcanal es solo un 50 % de la velocidad de las paredes [1].

Una de las ventajas del flujo electrocinético, en determinados procesos, es que el perfil formado evita la difusión no uniforme que ocurre cuando se aplica presión, otra ventaja del flujo causado por este método es que se planea usarlo para otras aplicaciones electrónicas en chip. Sin embargo, el flujo electrocinético requiere de altos voltajes, dificultando así su miniaturización. Otra desventaja de dicho flujo es la variabilidad de propiedades de superficie lo cual repercute en la variación de la velocidad del flujo, y por ello a veces se vuelven impredecibles los tiempos de residencia dentro de los microdispositivos.

Todas las ventajas comentadas anteriormente hacen que el movimiento de fluidos a pequeña escala juegue un papel fundamental en el desarrollo de la tecnología MEMS y hace que los investigadores tengan la mira puesta en su estudio.

1.1 Objetivos

El objetivo principal del presente Trabajo Fin de Grado es el diseño y la fabricación de un actuador térmico de burbuja para el movimiento de muestras líquidas.

Para llevar a cabo el propósito principal de este proyecto se requiere que cumpla los siguientes objetivos específicos o especificaciones:

- Uso de tecnologías de producción masiva.
- Proceso de fabricación rápido, simple y de bajo coste.
- Consecución de un caudal del orden de los microlitros.
- Uso de materiales de bajo coste.
- Microbomba sin válvulas para el control de las muestras líquidas.

1.2 Estructura de la memoria

En este subapartado se detalla la organización de los contenidos que cubren la memoria, realizando una breve descripción de lo que abarca cada uno de ellos.

1. Introducción y objetivos. En este apartado que se acaba de tratar se han abordado las motivaciones que han llevado a la realización de este proyecto y los objetivos que se quieren lograr con unas determinadas especificaciones.
2. Estado del arte. En este punto se describe brevemente el funcionamiento de los tipos de microbombas existentes a día de hoy y algunos de los procesos típicos de fabricación.

3. Diseño conceptual y materiales. En este capítulo se explican los principios que rigen el funcionamiento del sistema y se valora la idoneidad de un material frente a otro para el sistema propuesto.
4. Proceso de fabricación. Se detallan los diferentes procesos de fabricación, tecnologías y técnicas de las que se ha hecho uso para llevar a cabo la fabricación del sistema.
5. Caracterización previa de parámetros funcionales. Se caracterizan los calentadores de cobre fabricados y se encuentra el rango de corriente sobre el cual se tiene el control de la vibración de la burbuja.
6. Circuito electrónico. Se aborda el diseño del circuito electrónico capaz de provocar controladamente la expansión y colapso de la burbuja. Además, se realiza su simulación y se detalla la fabricación del circuito en PCB.
7. Montaje experimental y resultados. En este apartado se realiza la descripción del montaje experimental, el procedimiento llevado a cabo para la realización de las pruebas y por último se muestran y analizan los resultados obtenidos.
8. Conclusiones y líneas futuras. En este último capítulo se establecen las conclusiones a las que se llegan tras la realización del trabajo, se recoge la problemática encontrada a lo largo de su desarrollo y se enuncian las posibles mejoras que, en un futuro, se pueden diseñar y aplicar al proyecto.

2 ESTADO DEL ARTE

Las microbombas son dispositivos que pueden controlar y manipular pequeños volúmenes de fluidos. Aunque cualquier tipo de bomba pequeña se conoce a menudo como microbomba, una definición más precisa restringe este término a bombas con dimensiones funcionales en el rango de microlitros. Suele estar formada por membranas, cámaras, válvulas y canales. Estas microbombas son de especial interés en la investigación microfluídica y en los sistemas microelectromecánicos. Su reducido tamaño, el bajo coste y la precisión de dosificación alimentan el interés creciente por este tipo innovador de bomba.

2.1 Microbombas

Las microbombas pueden ser clasificadas en mecánicas y no mecánicas, en función de la manera como se convierte la energía mecánica o no mecánica externa en energía cinética; es decir, energía de movimiento. La microbomba mecánica requiere de un mecanismo de bombeo o actuador físico, mientras que la no mecánica prescinde de este mecanismo.

Comúnmente, una microbomba mecánica tiene tres componentes básicos: un microactuador, una cámara de bombeo y válvulas de entrada y salida. Para su funcionamiento se necesita aplicar una energía externa a sus actuadores, los cuales cambiarán el volumen de la cámara de bombeo y, finalmente, las válvulas de entrada y salida permitirán que el fluido circule a través de la microbomba. Las microbombas mecánicas tienen un flujo volumétrico mayor que las microbombas no mecánicas. Las primeras ofrecen un rango de flujo volumétrico de entre 10 microlitros por minuto hasta varios mililitros por minuto; en cambio, las microbombas no mecánicas administran un menor flujo volumétrico, cercano a 10 microlitros por minuto. Desde este punto de vista, los pequeños flujos de las microbombas no mecánicas son más adecuados para obtener flujos regulados y controlados [2].

Para desarrollar un diseño adecuado de microbombas para aplicaciones en tiempo real es importante tener claro los conceptos de actuador, válvulas, cámara o depósito y el mecanismo *nozzle-diffuser*, entre otros.

El actuador es la parte de la microbomba que convierte la energía en movimiento. Es usada para proporcionar fuerza para el flujo de fluido en la microbomba. El actuador toma energía eléctrica, de calor, presión de líquido, presión de aire y lo convierte en movimiento. En la mayoría de las microbombas descritas en la literatura, la actuación del disco está unida con una membrana que se utiliza para empujar el fluido.

Las válvulas se utilizan para controlar el flujo de fluido, abriendo, cerrando u obstaculizando parcialmente los canales. En los sistemas microfluídicos las válvulas se describen como activas y pasivas. En las válvulas pasivas no hay mecanismo de accionamiento y el control del flujo de fluido depende únicamente de la diferencia de presión de la cámara donde se encuentra el líquido y el flujo de fluido en una dirección. En las activas, están presentes elementos activos para la apertura y cierre que son accionados por una fuente externa.

El diseño de la cámara es crítico en los sistemas microfluídicos y puede influir significativamente en el volumen, las características de la presión y los coeficientes de pérdida *nozzle-diffuser*. La mayoría de las microbombas tienen una configuración de cámara única. Sin embargo, con el fin de mejorar el

rendimiento, también existen de dos o tres cámaras. Las microbombas en las que las cámaras de bombeo están dispuestas secuencialmente o fabricadas de tal manera que las múltiples cámaras están en serie se conocen como microbombas peristálticas.

El elemento *nozzle-diffuser* se utiliza principalmente como rectificador del flujo en microbombas sin válvulas. Un esquemático de la acción *nozzle-diffuser* se muestra en la Figura 2-1. El elemento *nozzle-diffuser* funciona de tal manera que durante el modo de suministro entra más fluido a través de la tobera de entrada que del que sale por la tobera de salida. En el modo “bomba” se produce la acción inversa. Stemme y Stemme [3] fueron los primeros en realizar microbombas sin válvulas haciendo uso del elemento *nozzle-diffuser* para la rectificación del flujo.

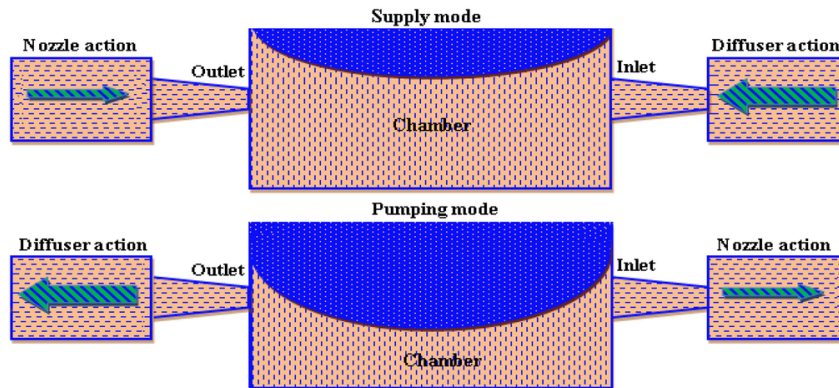


Figura 2-1. Esquemático del elemento *nozzle-diffuser*

Como se ha comentado anteriormente, las microbombas mecánicas necesitan un actuador físico o algún tipo de mecanismo para realizar la acción de bombeo. Las microbombas mecánicas más populares son la electrostática, piezoeléctrica, termoneumática, efecto térmico de memoria, bimetálica, película polímera conductiva iónica, electromagnética y de cambio de fase.

Las microbombas no mecánicas convierten la energía no mecánica disponible en energía cinética para hacer fluir los fluidos a través de los microcanales. Algunas microbombas no mecánicas son la magnetohidrodinámica, electrohidrodinámica, electroosmótica, “electromojado”, de burbuja, electroquímica y de evaporación. La clasificación de las microbombas se muestra en la Figura 2-3.

A continuación, se explica brevemente el funcionamiento de algunas de las microbombas nombradas.

2.1.1 Electroestática

La actuación electrostática se basa en la Ley de Coulomb donde dos placas con cargas opuestas se atraen. La fuerza generada entre las placas cuando se aplica una tensión se expresa en la siguiente ecuación:

$$F = \frac{dW}{dx} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A V^2}{x^2} \quad (2 - 1)$$

donde F es la fuerza electrostática, W la energía almacenada, ϵ la constante dieléctrica, A el área del electrodo, V el voltaje aplicado y x el espacio entre electrodos.

Comúnmente, las microbombas electrostáticas tienen actuadores paralelos que operan como electrodos como se aprecia en la Figura 2-2.

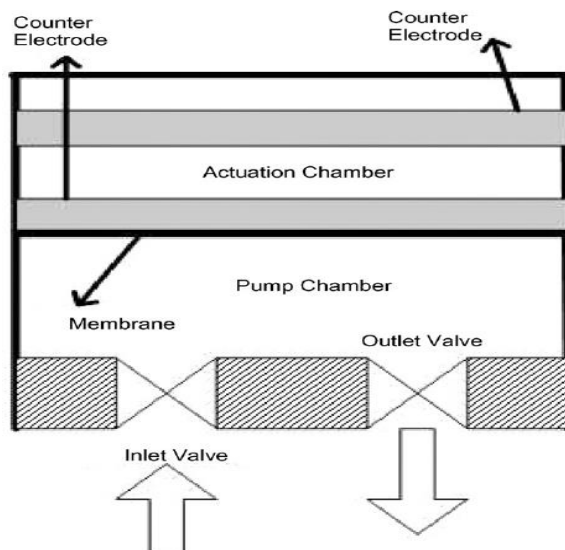


Figura 2-2. Ilustración esquemática de la microbomba electrostática

Por lo general, un electrodo está colocado sobre una superficie fija y el otro sobre una membrana móvil. La membrana móvil puede ser accionada y desplazada hacia el electrodo fijo al aplicar una diferencia de voltaje eléctrico a través de los electrodos.

Cuando el voltaje se retira, la membrana deformada regresa a su posición original. Así, la operación de bombeo se consigue cambiando periódicamente el voltaje suministrado. El fluido del depósito es forzado a fluir hacia los microcanales debido a la diferencia de presión inducida por la deformación de la membrana en la cámara. Las ventajas de las microbombas electrostáticas son su mínimo consumo de potencia, del orden de 1 mW, y su rápido tiempo de respuesta. Una gran desventaja es la pequeña carrera del actuador, que está normalmente limitada a unas 5 micras aplicando voltajes de alrededor de 200 V [4].

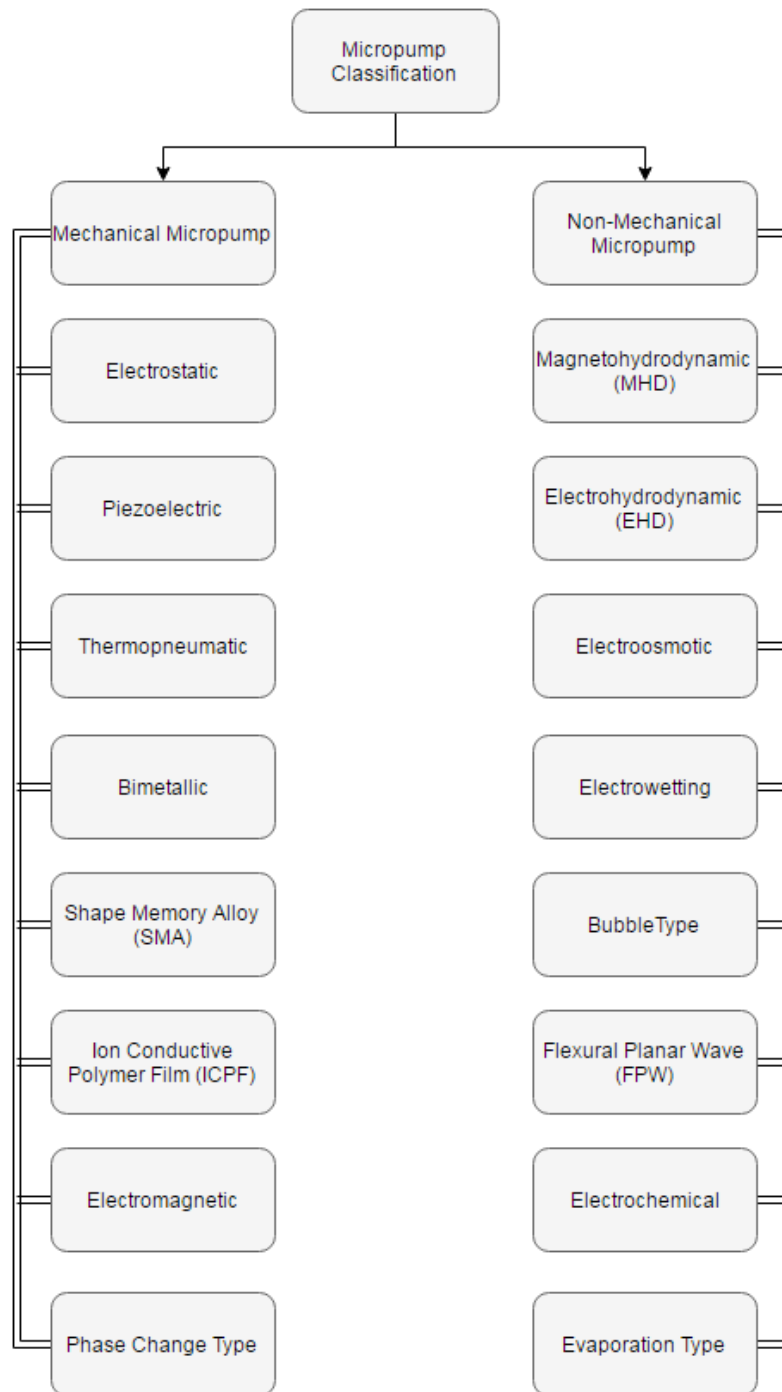


Figura 2-3. Clasificación de microbombas con diferentes métodos de actuación

La primera microbomba basada en el accionamiento electrostático fue desarrollada por J. W. Judy y otros [5]. En su fabricación no se utilizaron agentes de silicio en masa ni técnicas de unión de obleas. En su lugar, se utilizó deposición selectiva y grabado de capas de sacrificio. La microbomba consistió en una válvula de retención activa, una membrana de bombeo y una válvula de salida activa. Todas las partes fueron encapsuladas por nitruro de silicio y fueron accionadas por fuerza electrostática. Se requerían voltajes de actuación de aproximadamente 50 V para el cierre de la válvula y la deflexión de la membrana. Sin embargo, no se reportaron datos de la acción de bombeo.

Los primeros resultados experimentales de la microbomba electrostática fueron reportados por Zengerle y otros [6]. Se observó un caudal de 70 $\mu\text{L}/\text{min}$ y una contrapresión de 2,5 kPa a 170 V con una frecuencia de 25 Hz.

2.1.2 Piezoeléctrica

La conversión de energía mecánica en señal electrónica (voltaje) y viceversa se conoce como efecto piezoeléctrico. Los materiales que poseen este efecto normalmente no tienen centro de simetría en su estructura. Al aplicar tensión a tales materiales se altera la separación entre las cargas positiva y negativa que conduce a la polarización neta en la superficie. Se crea un campo eléctrico con potencial en esos materiales debido a la polarización. Esta propiedad puede usarse para formar el actuador, la microbomba, la cabeza de la impresora de chorro de tinta, etc. La eficacia de la energía y viceversa puede expresarse por el factor K :

$$K^2 = \frac{\text{salida de energía mecánica}}{\text{entrada de energía eléctrica}} \quad (2 - 2)$$

Esta microbomba está integrada por un disco piezoeléctrico (colocado sobre un diafragma), una cámara de bombeo y válvulas de entrada y salida de flujo. Cuando un voltaje eléctrico variable es aplicado al cristal piezoeléctrico, se produce una deformación del diafragma hacia arriba y hacia abajo que impulsa a un microfluido (Figura 2-4).

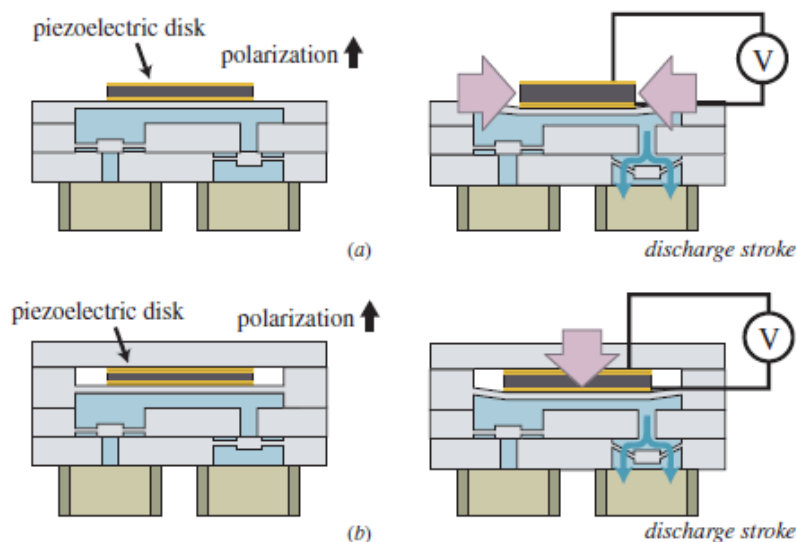


Figura 2-4. (a) Microbomba piezoeléctrica en configuración de deformación lateral. (b) Microbomba piezoeléctrica en configuración de deformación axial

En la Figura 2-4 (a) la superficie inferior del disco piezoeléctrico está unida al diafragma de la bomba y la superficie superior no está sujeta. Durante el funcionamiento, se produce una deflexión del diafragma producido por la deformación radial en el disco piezoeléctrico. Se aplica un campo eléctrico axial al disco. En la Figura 2-4 (b) el disco piezoeléctrico se encuentra entre el diafragma de la bomba y un bastidor rígido. Durante el funcionamiento, el diafragma de la bomba se desvía principalmente como resultado de la deformación axial en el disco piezoeléctrico.

Las microbombas piezoeléctricas involucran una gran fuerza de accionamiento, un rápido tiempo de respuesta y una estructura simple. Sin embargo, su proceso de fabricación es relativamente complejo, debido a que sus materiales piezoeléctricos no son sencillos de procesar.

Van Lintel y otros [7] reportaron el primer intento de fabricar una microbomba de silicio basada en el accionamiento piezoeléctrico. La microbomba estaba compuesta por una cámara de bombeo, una delgada membrana de vidrio accionada por un disco piezoeléctrico y válvulas de retención pasivas de

silicio para dirigir el flujo. El disco piezoeléctrico se unió mediante adhesivo de cianoacrilato. Se observó un caudal máximo de 8 $\mu\text{L}/\text{min}$ y una contrapresión de 9,8 kPa para 125 V aplicados con una frecuencia de 1 Hz. Fue el primer trabajo reportado con éxito utilizando tecnologías de micromecanización.

2.1.3 Termoneumática

En la microbomba termoneumática, la cámara que está contenida de aire se expande y comprime periódicamente mediante un par de calentadores y enfriadores como se muestra en la Figura 2-5. El cambio periódico en el volumen de la cámara proporciona a la membrana un movimiento regular para el flujo de fluido. Para líquidos, el aumento de la presión se expresa como:

$$\Delta P = E \left(\beta \Delta T - \frac{\Delta V}{V} \right) \quad (2 - 3)$$

Donde ΔP es el incremento de presión, E el módulo de elasticidad, β el coeficiente de expansión termal, ΔT el incremento de temperatura y $\frac{\Delta V}{V}$ es el porcentaje de cambio de volumen.

Una presión elevada se traduce en grandes deflexiones y fuerzas, haciendo que consuma mucha potencia y tenga un tiempo de respuesta lento, propiedades características de los métodos de accionamiento térmico. El esquemático de la microbomba termoneumática se muestra en la Figura 2-5.

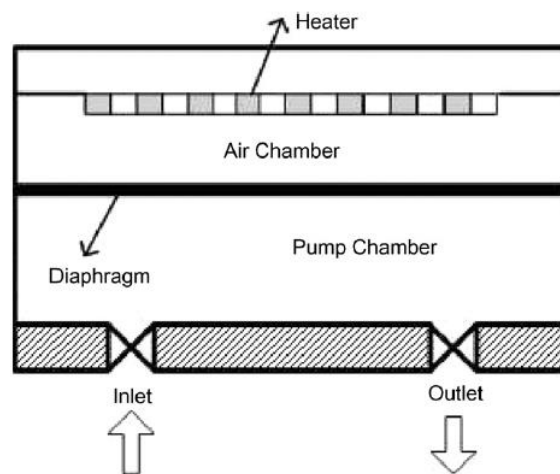


Figura 2-5. Esquemático de una microbomba termoneumática

Hasta 1990, todos los diseños desarrollados de microbombas se basaban en discos piezoeléctricos bimorfos o monoformos. Con el fin de fabricar microbombas utilizando técnicas de microingeniería tales como tecnología de película, técnicas de fotolitografía y micromecanizado de silicio, los investigadores buscaron actuadores micromecanizables. El primer trabajo sobre la utilización de actuadores micromecanizables fue realizado por Van De Pol y otros [8]. El principio de accionamiento termoneumático se adoptó a partir de Zdelblich y otros [9] que reportaron la primera microbomba termoneumática.

2.1.4 Electromagnética

El electroimán es un tipo de imán que se basa en la combinación de campos eléctricos y magnéticos. Cuando la corriente pasa a través de las bobinas se produce el campo magnético. La resistencia del electroimán puede variar fácilmente cambiando la corriente eléctrica que fluye a través de las bobinas. La fuerza experimentada por la carga debido al campo electromagnético se conoce como la Fuerza de Lorentz, dada a continuación:

$$F = (I \times B)L \quad (2 - 4)$$

Donde F es la fuerza electromagnética (Fuerza de Lorentz), I la corriente que fluye por el cable, B el campo magnético y L la longitud del cable.

La fuerza generada es grande, sin embargo, el accionamiento electromagnético requiere de un campo electromagnético externo permanente. Una ilustración de una microbomba electromagnética se muestra en la Figura 2-6.

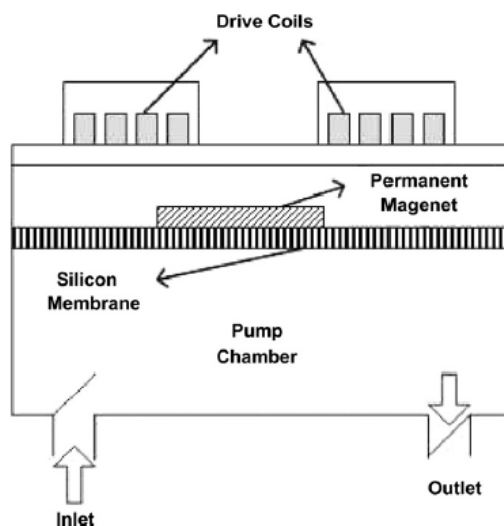


Figura 2-6. Esquemático de una microbomba electromagnética

Una típica microbomba electromagnética consiste en una cámara con válvulas de entrada y salida, una membrana flexible, un imán permanente y un conjunto de bobinas de accionamiento. El imán o el conjunto de bobinas puede estar unido a la membrana. Cuando se impulsa corriente a través de las bobinas, el campo magnético resultante crea una fuerza de atracción o repulsión entre las bobinas y el imán permanente.

El accionamiento electromagnético es grande y cubre una distancia más larga en comparación con el accionamiento electrostático. Además, requiere un bajo voltaje de funcionamiento. Sin embargo, el accionamiento electromagnético no se beneficia de la pequeña escala ya que la fuerza electrostática también se reduce. Por tanto, su utilización para actuadores microfabricados es limitada ya que sólo unos pocos materiales magnéticos pueden ser micromecanizados fácilmente. En general, las microbombas electromagnéticas tienen un alto consumo de energía y una gran disipación de calor.

Uno de los primeros actuadores electromagnéticos fue propuesto por Bohm y otros [10]. Una microbomba de plástico con un rendimiento razonable se fabricó utilizando métodos de producción micromecánicos convencionales. La microbomba constaba de dos partes de válvulas plegadas con una fina membrana de válvula entre ellas. La entrada y salida estaban situadas en la parte inferior de la microbomba, mientras que la membrana se colocó en la parte superior. Un actuador electromagnético (imán permanente) se colocó en una bobina que se usó en combinación con una membrana flexible. El consumo de energía fue de 0,5 W y se lograron caudales de 40.000 $\mu\text{l}/\text{min}$ para el aire y 2100 $\mu\text{l}/\text{min}$ para el agua. El volumen ocupado por la bobina electromagnética era relativamente grande, así pues, las dimensiones finales de la microbomba electromagnética también lo fueron.

2.1.5 Magnetohidrodinámica

La teoría magnetohidrodinámica se basa en la interacción de los fluidos eléctricamente conductores con un campo magnético. El concepto de microbomba magnetohidrodinámica (MHD) es

relativamente nuevo y una de las primeras microbombas desarrolladas por MHD fue desarrollada por Jang y Lee [11] en 1999. MHD se refiere al flujo de fluido eléctricamente conductor en campos eléctricos y magnéticos. La estructura típica de la microbomba MHD es relativamente simple, consta de microcanales, dos paredes limitadas por electrodos para generar el campo eléctrico y otras dos paredes limitadas por imanes permanentes de polaridad opuesta para generar el campo magnético. Una microbomba magnetohidrodinámica típica se muestra en la Figura 2-7.

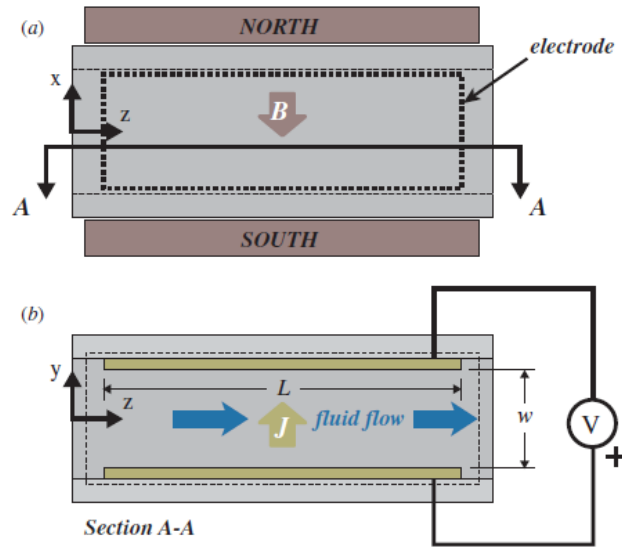


Figura 2-7. Vista superior (a) y vista transversal (b) de una microbomba electrodinámica. El campo magnético transversal ejerce una fuerza de Lorentz sobre los iones portadores de corriente que fluyen a través del canal, produciendo flujo en la dirección axial

En un canal rectangular con densidad de corriente transversal J_y y densidad de flujo magnético transversal perpendicular B_x , la presión máxima es:

$$P = J_y B_x l \quad (2 - 5)$$

Y el caudal máximo del orden de:

$$Q = J_y B_x \frac{\pi D_h^4}{128\mu} \quad (2 - 6)$$

Donde l es la longitud del canal de bombeo y D_h es el diámetro hidráulico (área de la sección transversal multiplicada por 4 y dividida por el perímetro). El rendimiento de las microbombas magnetohidrodinámicas está limitado típicamente por la densidad del flujo magnético. Además, los efectos térmicos limitan a menudo la densidad de corriente [12].

2.1.6 Electrohidrodinámica

Las microbombas electrohidrodinámicas (EHD) se basan en la interacción de fuerzas electrostáticas con iones en fluidos dieléctricos. La densidad de fuerza del cuerpo eléctrico F_e que resulta del campo eléctrico aplicado de magnitud E viene dada por:

$$F_e = qE + P \cdot \nabla E - \frac{1}{2} E^2 \nabla \epsilon + \frac{1}{2} \nabla \left[E^2 \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} \right)_T \rho \right] \quad (2 - 7)$$

Donde q es la densidad de carga, ϵ es la permitividad del fluido, ρ es la densidad del fluido, T es la temperatura del fluido y P es la polarización del vector. Varias microbombas EHD basadas en la

fuerza de Coulomb que actúa sobre cargas libres en un campo, representadas por el término qE de la ecuación, han sido reportadas. La operación de estas microbombas requiere la existencia de una carga espacial en un fluido dieléctrico. La carga espacial puede producirse por la no homogeneidad del fluido, o por la disociación o inyección de carga directa. Estos tres mecanismos para la generación de carga espacial están asociados con la inducción, conducción y el bombeo EHD por inyección, respectivamente.

En las microbombas electrohidrodinámicas de inducción, la carga se induce en un fluido no homogéneo a través de la aplicación de una diferencia de potencial a través del fluido. Esto puede conseguirse, por ejemplo, con un campo eléctrico con una componente transversal a la dirección del flujo, como se muestra en la Figura 2-8.

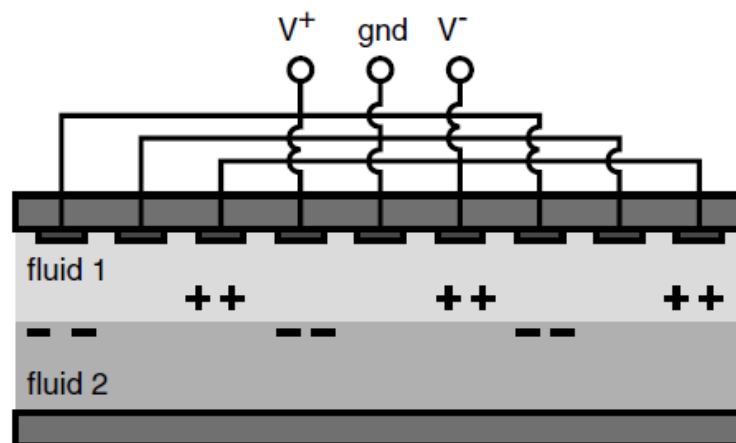


Figura 2-8. Microbomba electrohidrodinámica (inducción). La conmutación secuencial de las matrices de electrodos da como resultado un flujo neto de fluido

Los electrodos se activan en una configuración de onda progresiva y los componentes axiales del campo eléctrico dan lugar a un flujo neto de fluido. Bart y otros [13] reportaron una microbomba electrohidrodinámica de inducción que bombea aceite de silicona. Las medidas del rendimiento cuantitativo no fueron reportadas.

La aplicación de un campo eléctrico débil entre electrodos sumergidos en fluido dieléctrico causa la disociación de los grupos ionizables en la interfaz electrodo-fluido. Las fuerzas de Coulomb actuando sobre los iones producidos a partir de dicha disociación dan lugar a conducción a través del líquido. Las microbombas EHD de conducción dependen de la resistencia iónica asociada con esta conducción bipolar. Hasta la fecha, no se ha reportado aún ninguna microbomba basada en el bombeo EHD por conducción.

También se han descrito microbombas EHD basadas en la inyección de iones en el fluido en los electrodos. La aplicación de un campo eléctrico muy elevado provoca la inyección de iones en el fluido. La fuerza de Coulomb actúa sobre las cargas inyectadas; la interacción viscosa genera flujo.

2.1.7 Electrosmótica

La electroósmosis puede ser llamada también como fenómeno electrocinético y puede usarse en soluciones electrolíticas. En la electroósmosis, una solución iónica se mueve en relación con las superficies estacionarias y cargadas cuando se aplica un campo eléctrico externo. Cuando una solución iónica entra en contacto con superficies sólidas, la carga eléctrica instantánea es adquirida por las superficies sólidas. Por ejemplo, el cristal de silicio que se utiliza normalmente en la fabricación de microcanales se carga negativamente cuando una solución acuosa entra en contacto

con ella. La superficie cargada negativamente atrae los iones cargados positivamente de la solución. Cuando se aplica un campo eléctrico externo a lo largo del canal, la delgada capa de fluido rico en cationes adyacente a las superficies sólidas comienza a moverse hacia el cátodo. En la Figura 2-9 se muestra el bombeo electroosmótico del fluido en un canal. Las microbombas electroosmóticas tienen ciertas ventajas, una importante es que el bombeo electroosmótico no implica ninguna parte móvil como las válvulas de retención. Se pueden utilizar técnicas básicas y baratas de MEMS para la fabricación. En cuanto al funcionamiento de la microbomba electroosmótica, la dirección del flujo se controla cambiando la dirección del campo eléctrico externo. Las principales limitaciones de estas microbombas son la alta tensión que se requiere para su funcionamiento y que la solución sea eléctricamente conductora [14].

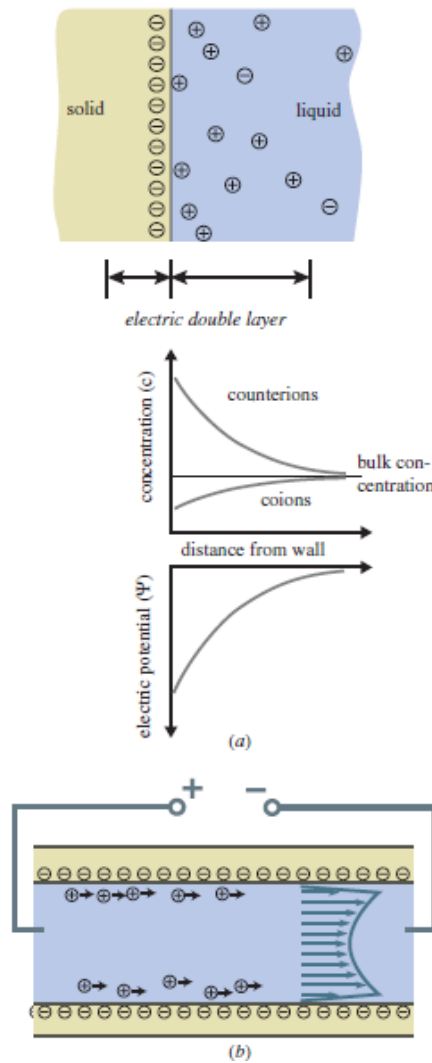


Figura 2-9. Electroquímica de una interfaz sólido-líquido y flujo electroosmótico

En la Figura 2-9 (a) las reacciones químicas en la interfaz dejan la superficie cargada (mostrada como negativa en la figura). Los contraiones del líquido se acumulan en la proximidad de la superficie cargada, formando la doble capa eléctrica. (b) Un campo eléctrico externo provoca el movimiento de contraiones que protegen una la pared cargada negativamente. El arrastre de iones fuerza el flujo contra un gradiente de presión.

Las microbombas electroosmóticas más básicas son simplemente capilares o secciones de microcanales (reellenas de medios porosos o reellenas únicamente de líquido) con electrodos

sumergidos dentro del canal final y una resistencia de flujo en serie con el canal. Los caudales producidos por tales microbombas son típicamente muy pequeños, del orden de $1 \mu\text{l}/\text{min}$.

La producción de caudales más elevados usando el bombeo electroosmótico generalmente requiere de estructuras con dimensiones mayores en las direcciones normales al flujo que se encuentran en canales individuales o capilares. Estas bombas típicamente incorporan estructuras porosas en las que cada poro actúa como un capilar para generar flujo electroosmótico.

2.1.8 De burbuja

El efecto de bombeo en las microbombas de tipo burbuja se basa en la expansión periódica y el colapso de la burbuja generada en el microcanal. El cambio de volumen en la cámara se incorpora con el mecanismo *nozzle-diffuser* que se utiliza para determinar la dirección del flujo. Las burbujas se generan por el proceso de calentamiento. En la Figura 2-10 se muestra una ilustración esquemática de la microbomba de tipo burbuja en expansión y contracción.

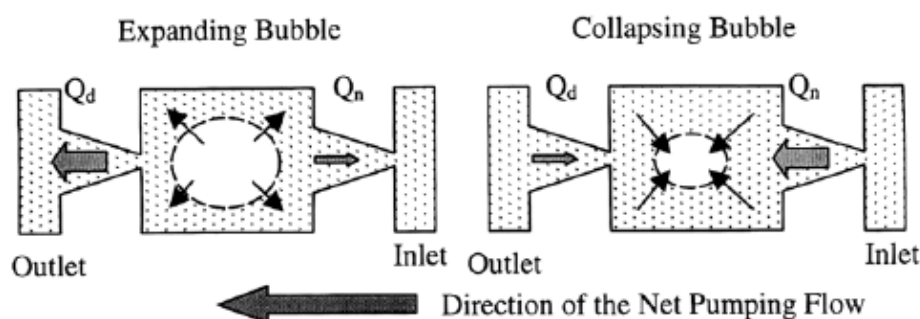


Figura 2-10. Microbomba de tipo burbuja

La microburbuja se genera en la microcámara por calentamiento para crear una fuente de presión. Cuando la burbuja se expande, el flujo de volumen en el difusor, Q_d , es mayor que el del *nozzle*, Q_n . Además, hay un flujo neto generado desde el *nozzle* hasta el difusor en cada ciclo. El límite de la burbuja trabaja como una membrana que "barre" a través de la cámara para minimizar el volumen muerto de la bomba. Además, con el diseño del *nozzle-diffuser* de este modo, se usa una válvula no convencional que facilita el proceso de fabricación de la microbomba.

Tsai y Lin [15] realizaron un informe de una microbomba de tipo burbuja basada en la creación de la burbuja por calentamiento y una regulación del flujo haciendo uso del esquema *nozzle-diffuser* mostrado anteriormente. La cámara de bombeo, los reguladores de flujo inyector/difusor y los microcanales fueron fabricados sobre sustrato de silicio. El valor máximo del caudal de la microbomba de tipo burbuja era de $5 \mu\text{l}/\text{min}$, aplicando un voltaje que se aplicaba periódicamente con una frecuencia de 250 Hz, un factor de trabajo del 10 % y consumiendo 1 W de potencia.

2.2 Procesos de fabricación

El proceso de fabricación general de un microsistema sigue una serie de pasos básicos que se muestran en la Figura 2-11. Previamente se ha de seleccionar el material sustrato que se desea mecanizar y posteriormente se plantea la secuencia de fabricación que se llevará a cabo.

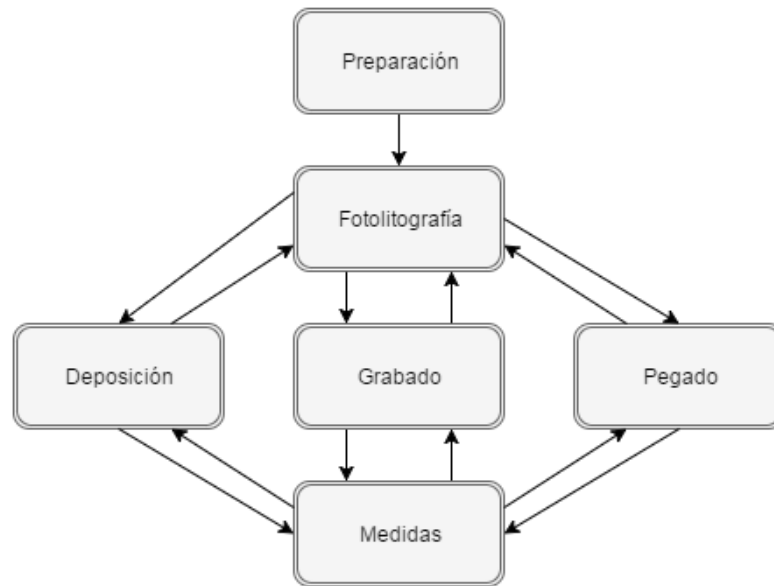


Figura 2-11. Proceso de fabricación general de un microsistema

El material base con el que se trabaja principalmente en MEMS es el silicio. A día de hoy, la mayoría de los dispositivos MEMS están hechos o compuestos de silicio dado su carácter semiconductor y sus buenas propiedades. No obstante, cada vez cobran más fuerza otros materiales alternativos al silicio, más baratos como pueden ser los polímeros. El bajo coste y la capacidad de los polímeros de poseer características modificables simplemente por la adición de productos químicos durante su fase de formación hacen que se estén convirtiendo en el material preferido en aplicaciones MEMS.

En este apartado se mostrará el estado del arte de las técnicas y tecnologías de fabricación MEMS. En primer lugar, se presentarán los distintos tipos de grabado, posteriormente las tecnologías de micromecanizado y, por último, las técnicas necesarias para llevarlas a cabo. Además, al final de este apartado se hará un breve estudio de dos de los polímeros más utilizados (PDMS y SU-8) en aplicaciones MEMS.

2.2.1 Grabado y litografía

Los procesos de grabado, limpieza y litografía están presentes en muchas etapas del proceso de fabricación de microcircuitos. Los procesos de grabado junto con los de litografía se utilizan fundamentalmente para los siguientes propósitos:

- Abrir ventanas en las capas protectoras depositadas. De ese modo se realizan difusiones o implantes en regiones selectivas del semiconductor.
- Grabado en el sustrato de silicio para realizar “pozos de aislamiento”.
- Crear las diferentes formas de las capas de metalización.
- Formación de ventanas para tener acceso a las conexiones de los cables de metalización de los circuitos (*bonding pads*).

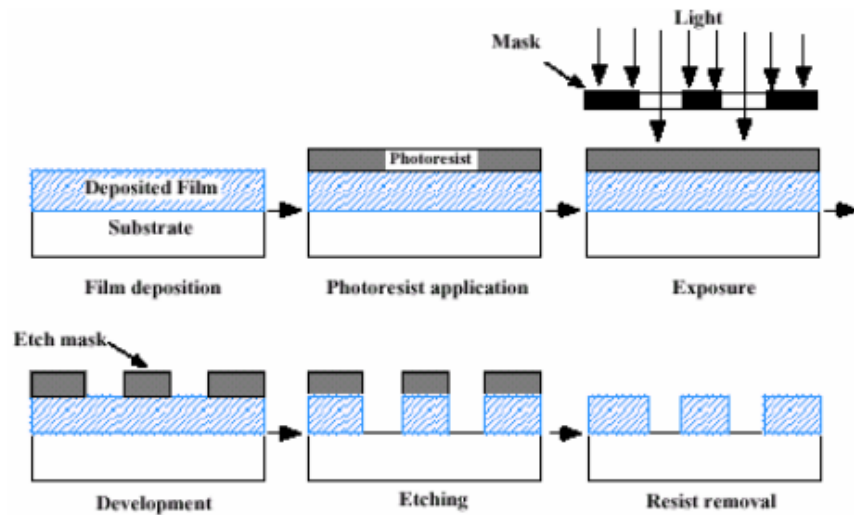


Figura 2-12. Esquema del proceso general de grabado y litografía: deposición de película y de la fotoresina, aplicación de la máscara en el proceso litográfico, grabado de la máscara, grabado de la película, y eliminación final de la fotoresina

Transferencia de diseños: indica de qué manera un diseño (definido mediante una máscara) se transfiere a un sustrato mediante métodos químicos o físicos. Existen métodos “aditivos” y “substractivos”.

- Métodos **substractivos**:
 1. En primer lugar, se deposita la película sobre un sustrato.
 2. Posteriormente se realiza una capa de máscara con una forma adecuada de manera litográfica.
 3. Las regiones que no están cubiertas por la máscara son eliminadas mediante grabado.
- Métodos **aditivos** o **lift-off**:
 1. En primer lugar, se genera la máscara.
 2. Posteriormente se deposita la película sobre la máscara y el sustrato.
 3. Finalmente se eliminan las porciones de la película que recaen sobre la máscara mediante una disolución selectiva de la máscara en un líquido apropiado.

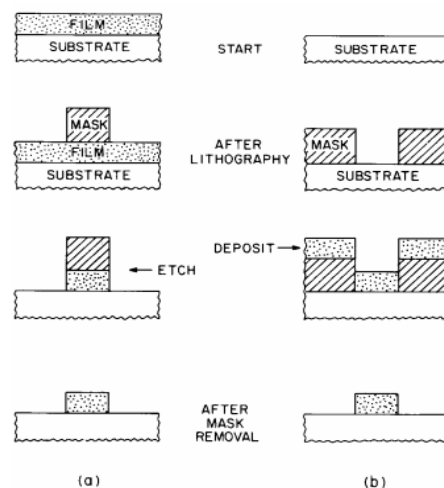


Figura 2-13. Método substractivo (a) y aditivo (b) de transferencia de diseños

Grabado: el término grabado se utiliza para describir todas las técnicas mediante las cuales el material se elimina uniformemente de una oblea. El grabado es el proceso contrario a la deposición. Después de realizar una deposición, las capas depositadas se eliminan (graban) de manera selectiva para formar una forma o diseño deseado. La máscara para realizar el grabado es usualmente una fotoresina.

El grabado puede realizarse en un entorno “seco” o “húmedo”. Históricamente, hasta hace unos años la mayoría de la fabricación de dispositivos se llevaba a cabo mediante el grabado químico o grabado húmedo (*wet etching*), que se basa en sumergir la oblea en una solución que tiene un disolvente líquido (proceso químico). En los últimos años, han sido desarrollados y denominados con el término genérico de grabado seco o grabado asistido por plasma (*dry etching*) nuevos procesos de grabados en fase gaseosa. Se utilizan disolventes en fase gaseosa proveniente de un plasma (procesos químicos y físicos).

Principalmente, estudiaremos los procesos de grabado seco siguientes:

- Molido iónico (*ion milling*).
- Bombardeo de iones (*sputtering*).
- Grabado iónico reactivo (*Reactive Ion Etching: RIE*).

2.2.1.1 Conceptos básicos del grabado

Hay diferentes parámetros a tener en cuenta que controlan la fidelidad de la reproducción de la máscara sobre la capa depositada de material.

- **Velocidad de grabado (R):** velocidad de eliminación de la película.
- **Uniformidad:** porcentaje de cambio en la velocidad del grabado de unas obleas a otras (dentro de un proceso) o comparativa entre *runs* de fabricación.
- El grabado no da lugar a paredes perfectamente rectas bajo el límite de la máscara. Se define por tanto un tercer parámetro, denominado **anisotropía (A)**. Mide la direccionalidad del grabado. Una situación ideal sería tener un perfil totalmente anisótropo (no hay grabado lateral). En general, lo que se desea es que el grabado lateral sea mucho menor que el grabado vertical.
- **Bias:** mide (en unidades de distancia) la diferencia en dimensiones laterales de la imagen máscara y la capa atacada. Si dicho parámetro es nulo, el perfil vertical coincide con el límite de la máscara y la máscara se transfiere con una fidelidad perfecta. Si las velocidades del grabado vertical y lateral son iguales, o cuando la velocidad de grabado es independiente de la dirección se denomina grabado **isótropo**.

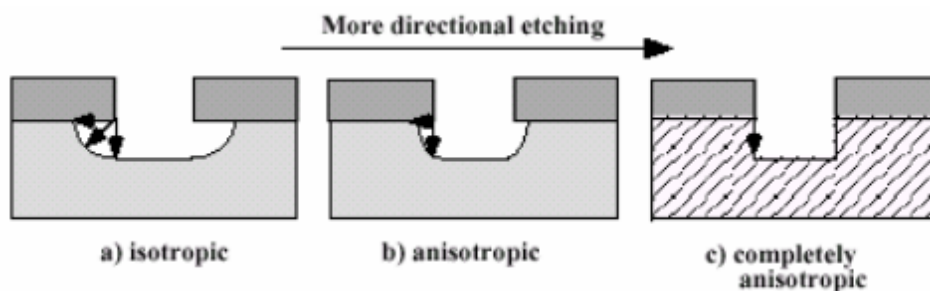


Figura 2-14. Perfil de grabado isótropo (a), anisótropo (b) y completamente anisótropo (c)

- **Selectividad:** ratio de las velocidades de grabado de los materiales que queremos eliminar y mantener. El reactivo puede atacar también al sustrato y a la máscara, y no sólo a la película depositada.

2.2.1.2 Requerimientos generales que ha de cumplir un grabado

- Obtener el perfil/direccionalidad deseado (con una cierta pendiente o prácticamente vertical).
- Obtener un ataque mínimo o bias bajo la máscara.
- Una gran selectividad entre otras capas expuestas y la resina.
- Ser un proceso uniforme y reproducible.
- Obtener un daño mínimo en la superficie y en el circuito.
- Limpieza, seguridad y costes razonables.

2.2.1.3 Grabado químico húmedo

Se caracteriza porque las obleas se sumergen en un disolvente líquido y gracias a la temperatura de la reacción y al agitado de la oblea se puede ajustar la velocidad.

Consta de tres pasos:

- El transporte de masa de los reactantes hacia la superficie a ser grabada.
- La reacción superficial que tiene lugar entre los reactivos y la capa que va a ser grabada.
- El transporte de los productos de la reacción desde la superficie hacia el exterior.

Existen varias formas de detener el ataque para no tener que controlar el tiempo: cambiar de material, dopado p⁺ o realizar una detención electroquímica.

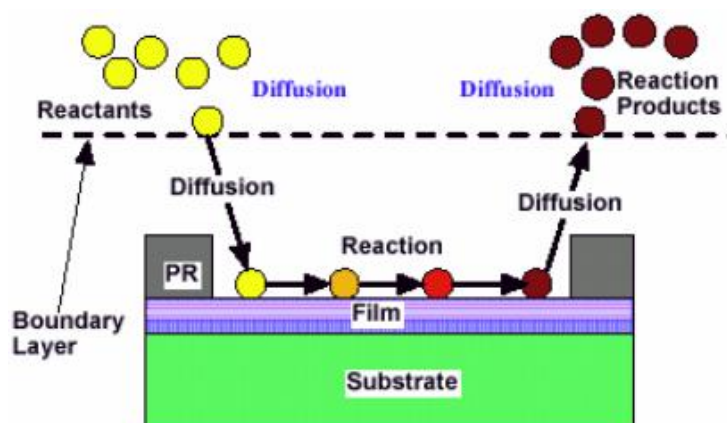


Figura 2-15. Proceso básico de grabado

2.2.1.4 Ejemplos de grabado químico húmedo

Ejemplo 1. Grabado químico húmedo de materiales cristalinos. Suele tener lugar en dos fases:

- **Oxidación:** tiene lugar por la acción de la diferencia de potencial aplicada en las celdas electrolíticas y da lugar al flujo de corrientes de corrosión que forman el óxido.

- **Disolución química del óxido:** se añaden disolventes químicos adicionales, los cuales deben ser solubles en agua de modo que eliminen el óxido de la superficie del semiconductor.

Ambos procesos tienen lugar simultáneamente mediante una mezcla de agentes en la misma solución del grabado.

Ejemplo 2. Grabado isótropo de silicio (Si):

Los disolventes comúnmente utilizados para el Si son mezclas de ácido nítrico y fluorhídrico. El papel del ácido nítrico es el de oxidante para el Si, por lo que da lugar a grandes cantidades de dióxido de silicio. Por otro lado, el papel del ácido fluorhídrico es el de disolver el dióxido de silicio. Ambas reacciones ocurren en una única.

2.2.1.5 Ventajas y desventajas del grabado químico húmedo

La principal ventaja del grabado húmedo es su alta selectividad debido a que están basados en procesos químicos. Las desventajas son una excesiva contaminación de partículas, un control del proceso muy pobre y que se trata de un proceso fundamentalmente isótropo (falta de anisotropía). Por ello, el grabado húmedo se utiliza para procesos de grabado que pretendan unos diseños poco críticos.

Hoy día las tecnologías de silicio y arseniuro de galio que incluyen la necesidad de interconectar un gran número de elementos para formar un circuito o la reducción de las dimensiones de los dispositivos hacen que se necesiten grabados selectivos en base al tipo de concentración, y a la composición del material, por lo que la resolución conseguida con el grabado húmedo no es suficiente. Es necesario el desarrollo del grabado seco.

2.2.1.6 Grabado seco

El grabado seco elimina el material mediante haces de iones energéticos o reacciones químicas ayudadas por plasma (se bombardea físicamente el material a eliminar). Se proporciona energía a los proyectiles que se mueven a gran velocidad cuando colisionan contra el sustrato.

Las ventajas del grabado en seco han hecho que haya reemplazado al grabado químico húmedo en tecnologías de circuitos integrados, ya que es posible realizar un grabado altamente direccional debido a la presencia de especies iónicas en el plasma y un campo eléctrico perpendicular a la oblea. Algunas de las técnicas son:

- *Sputtering* (grabado seco).
- *Ion milling* (IBE) o molido iónico (grabado seco).
- Procesos RIE (combinación de grabado seco con grabado químico).

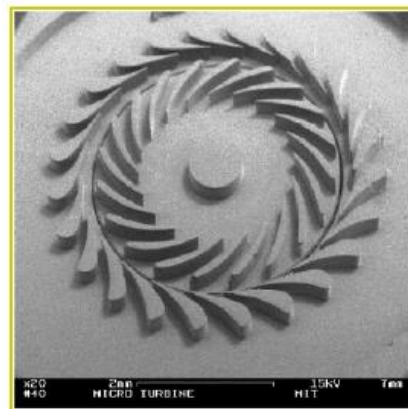


Figura 2-16. Microturbina fabricada por *ion-etching silicon*

Grabado	Húmedo	Seco
Método	Soluciones químicas	Bombardeo de iones o reactivo químico
Entorno y Equipo	Atmosférico, baño	Cámara de vacío
Ventajas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bajo coste 2. Fácil implementación 3. Velocidad de ataque elevada 4. Buena selectividad 	Alta precisión de características < 100nm
Desventajas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Baja precisión de características < 1µm 2. Uso de material químico peligroso 3. Contaminación de obleas 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Alto coste 2. Difícil implementación 3. Baja velocidad de ataque 4. Pobre selectividad 5. Daño potencial de radiación
Direccionalidad	Isotrópico (excepto para materiales cristalinos)	Anisotrópico

Tabla 2-1. Comparativa entre grabado húmedo y seco [16]

2.2.2 Tecnologías de micromecanizado

En la fabricación de sistemas MEMS utilizando tecnología de silicio, el micromecanizado es la fabricación de estructuras tridimensionales de dimensiones micrométricas. Existen dos tecnologías distintas: micromecanizado de volumen, donde se definen estructuras que abarcan un grosor de la oblea considerable y micromecanizado de superficie, donde se esculpen delgadas capas previamente depositadas.

2.2.2.1 Micromecanizado superficial

Consiste en fabricar estructuras con partes móviles, a partir de una serie repetida de pasos que consisten en depositar en la superficie de una oblea diferentes capas finas, a continuación, transmitir la máscara sobre las capas depositadas (fotolitografía) y un ataque químico selectivo para eliminar las capas de sacrificio. En este proceso intervienen dos tipos de materiales, el estructural (típicamente silicio policristalino o nitruro de silicio) y el material de sacrificio (normalmente dióxido de silicio) que es eliminado mediante un ataque químico para que la estructura pueda moverse.

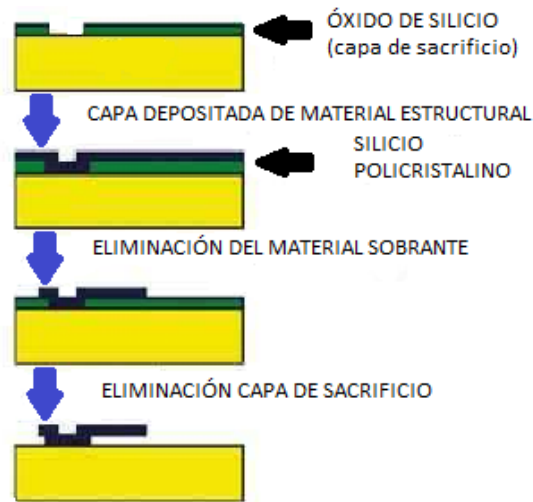


Figura 2-17. Proceso básico de micromecanizado en superficie

La Figura 2-17 muestra el proceso básico para obtener estructuras suspendidas. Los materiales clave en este proceso (polisilicio, nitruro de silicio y dióxido de silicio) están también presentes en el proceso CMOS, así como los procesos de deposición y ataque, hecho que permite encontrar procesos de fabricación que permiten la integración de CMOS con el micromecanizado en superficie.

Una vez depositadas todas las capas sobre la superficie de la oblea, se prosigue a eliminar el material no estructural para permitir el movimiento de la estructura. La eliminación del material de sacrificio se puede realizar con los dos tipos de ataques comentados anteriormente: ataque húmedo y ataque seco. Se utiliza preferentemente el ataque húmedo ya que puede ser altamente direccional incluso en materiales no cristalinos. Uno de los avances que ha permitido mejorar la profundidad de ataque ha sido la aparición del DRIE (ataque profundo con iones reactivos) que permite obtener estructuras de silicio con un espesor de hasta centenas de micras y con paredes extremadamente verticales, mientras que con el RIE (ataque con iones reactivos) sólo se podía llegar hasta unos 10 milímetros.

2.2.2.2 Micromecanizado de volumen

Esta técnica consiste en la eliminación selectiva del material de sustrato a fin de realizar componentes mecánicos miniaturizados. Se puede lograr utilizando medios químicos o físicos, siendo los químicos los más usados en la industria MEMS.

Una técnica de micromecanizado de volumen ampliamente utilizada es el grabado húmedo químico, que implica la inmersión del sustrato en una solución química reactiva que grabará las regiones expuestas del sustrato. El grabado húmedo químico es muy popular en MEMS ya que puede proporcionar una muy alta velocidad de grabado y selectividad. Además, las velocidades de ataque y la selectividad se pueden modificar por la alteración de la composición química de la solución del ataque, el ajuste de la temperatura de la solución del ataque químico, la modificación de la concentración de dopados del sustrato y la modificación de los planos cristalográficos del sustrato que están expuestos a la solución reactiva del ataque.

La Figura 2-18 muestra las etapas de fabricación de un proceso de micromecanizado de volumen. En la cara superior de la oblea se definen las estructuras o contactos, el número de capas y los niveles definidos dependerán de la estructura y la tecnología utilizada, pudiendo dar lugar a realizar un proceso CMOS completo. A continuación, se define una máscara en la cara dorso de la oblea, que puede ser de aluminio, óxido, nitruro o resina según el tipo de ataque que se realice. Por último, se realiza el ataque de volumen de casi toda la profundidad del sustrato, puede ser un ataque anisótropo o isotrópico. Tras esta etapa se pueden realizar más procesos en la cara de los componentes o en el dorso si fuese necesario.

Originariamente, el micromecanizado de volumen se realizaba mediante ataques húmedos. Los avances en los grabados por iones reactivos (RIE) en el control de la velocidad de ataque y la profundidad que se consigue, así como la verticalidad de los de los mismos han permitido la utilización de ataques secos para este tipo de micromecanizado.

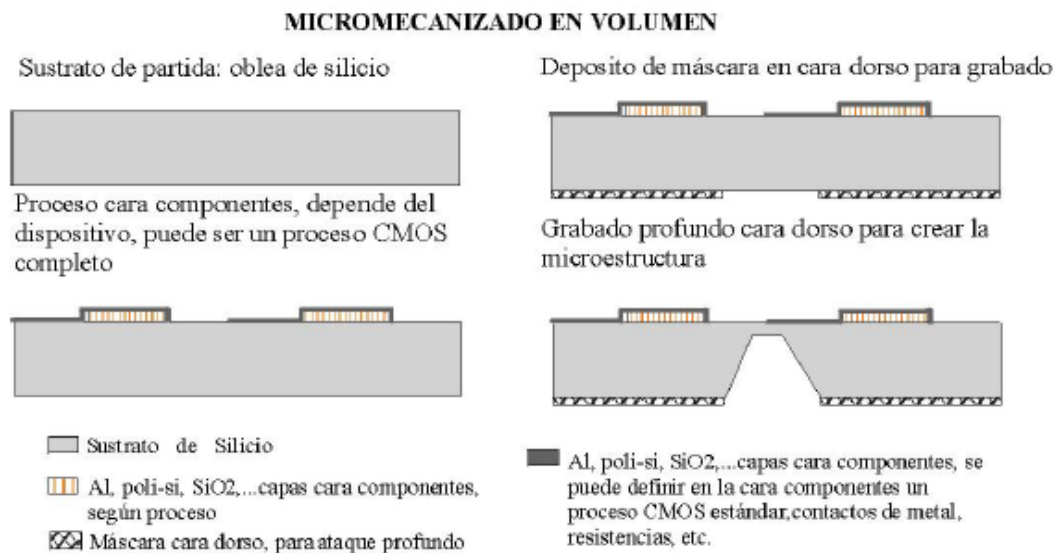


Figura 2-18. Proceso de micromecanizado de volumen

2.2.3 LIGA

A través del proceso LIGA se pueden lograr microestructuras de alta relación de aspecto, mediante el uso de litografía profunda de rayos X. Las siglas LIGA provienen del alemán y es una abreviación de litografía, galvanización y conformado. El proceso LIGA fue desarrollado a finales de los años 80 y hoy día aún se continúa desarrollando.

En el proceso LIGA se comienza con la elaboración de microestructuras en polímeros como por ejemplo el PMMA (polimetilmetacrilato). Mediante un proceso de galvanización se pueden copiar las estructuras a un material metálico o cerámico. La posterior producción en serie se puede lograr con un molde de níquel mediante estampado o inyección.

Las principales propiedades de una estructura realizada a partir de este proceso son:

- Gran libertad en la geometría del diseño.
- Se pueden conseguir altas relaciones de aspecto (más de 100).
- Paredes laterales paralelas con ángulos cercanos a los 90°.
- Paredes laterales lisas.
- Estabilidad lateral de algunos micrómetros en distancias de varios centímetros.
- Se pueden lograr detalles estructurales del orden de 30 nm en las paredes laterales.
- Se pueden lograr estructuras inclinadas adicionales mediante una segunda exposición.

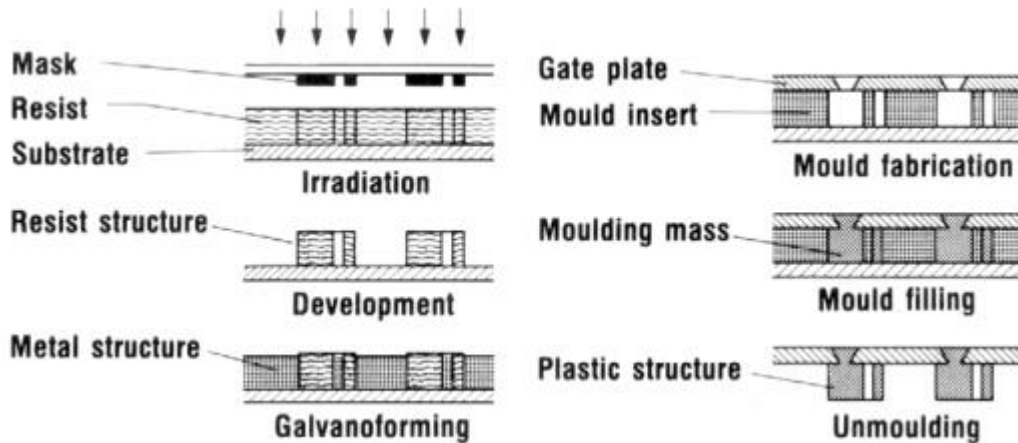


Figura 2-19. Pasos básicos del proceso LIGA

2.2.4 Técnicas de replicación

Podemos citar como principales técnicas de replicado a la inyección en un molde (*injection moulding*), grabado en relieve con calor (*hot embossing*) y técnicas de fundido mediante irradiación ultravioleta (*UV casting*) [17]. Con estas técnicas se pueden obtener réplicas con una resolución extremadamente alta (incluso tamaños por debajo de los 100 nm) así como elementos que se acoplen perfectamente a soportes o montajes de un tamaño mucho mayor (milímetros o centímetros), manteniendo una buena resolución óptica. Los pasos del proceso de replicación son prácticamente los mismos en todas las técnicas, e incluye la fabricación de un molde adecuado a la estructura que se quiere replicar, y la producción de las mismas en el material que se desee. Se utilizan normalmente materiales maleables o fundibles, que permitan reproducir las estructuras más o menos complejas del patrón en las nuevas piezas. Para la obtención del molde se suele utilizar níquel, aunque dependiendo de la técnica de replicación puede ser necesario que el molde sea transparente.

La principal diferencia que se encuentra entre las distintas técnicas de replicación es la resolución que se puede alcanzar en cada una de ellas, que, a su vez, influye de manera clara sobre el tiempo y el coste de producción. En este apartado comentaremos brevemente algunas características básicas de las técnicas citadas anteriormente.

2.2.4.1 Moldeado por inyección (*injection moulding*)

Como indica su nombre, este proceso consiste en la inyección del material sobre el que se van a realizar las réplicas en el molde, donde adquiere la forma deseada. Se suelen utilizar materiales termoplásticos (PC y PMMA), fácilmente fundibles y maleables. Como se puede ver en la Figura 2-20, el material plástico se introduce en forma de piezas sólidas en un depósito. La base de este depósito está conectada con un conducto cilíndrico, en el cual se funde el plástico a la vez que, por medio de la presión ejercida por un tornillo, es inyectado dentro del molde. Una vez inyectada la cantidad adecuada, dentro del molde se hace el vacío y se enfría el material, obteniéndose así la pieza deseada.

Es una técnica muy rápida, apta para un alto volumen de producción, de ahí que sea utilizada para la producción industrial. La principal desventaja que presenta es el alto coste de fabricación del molde.

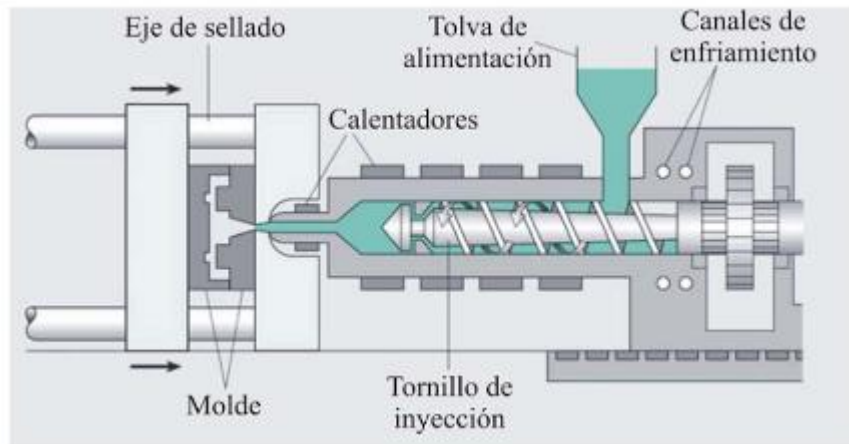


Figura 2-20. Proceso de replicado de elementos mediante *injection moulding*

2.2.4.2 Moldeado por compresión (*hot embossing*)

El proceso de estampado en caliente de polímeros termoplásticos se basa en el flujo plástico de un material alrededor de una herramienta de geometría inversa a la pieza deseada [18]. En primer lugar, el material se calienta hasta un punto intermedio entre la temperatura de transición vítrea y la temperatura de fusión, y después la herramienta se presiona contra el material uniaxialmente. Se suele utilizar una máquina similar a una prensa que es capaz de desarrollar una fuerza de estampado del orden de 5 a 20 toneladas. Gracias al avance de las técnicas litográficas, se han logrado obtener moldes que permiten reproducir por estampado estructuras con dimensiones del orden de los nanómetros. En este caso, la técnica se conoce con el nombre de nanoestampado.

Este proceso tiene un tiempo de producción mayor que el *injection moulding*, por lo que se utiliza en aplicaciones que necesiten una producción a menor escala o un menor número de unidades.

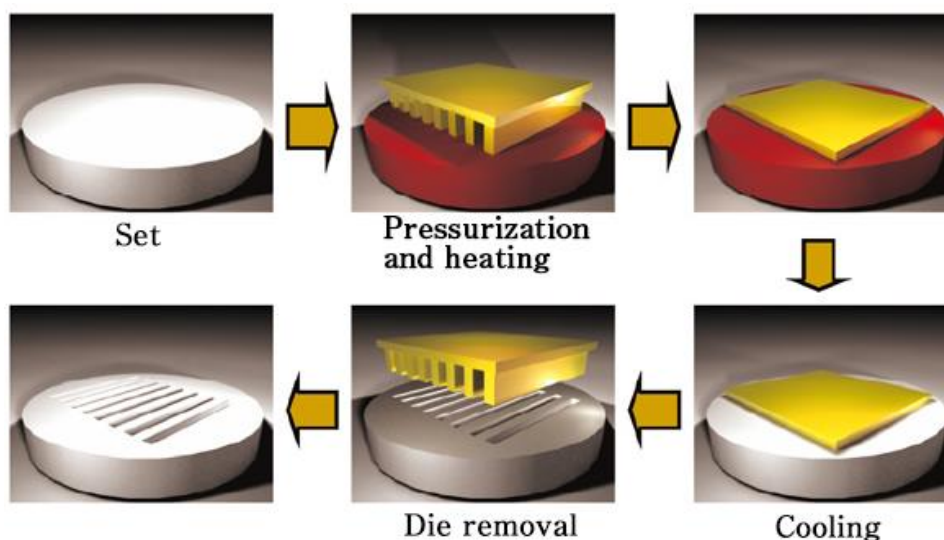


Figura 2-21. Fabricación mediante *hot embossing*

2.2.4.3 Técnicas de fundido (*UV casting*)

Este conjunto de técnicas presenta unas mejores características en cuanto a la resolución de los elementos obtenidos, pero el coste de replicación aumenta considerablemente al necesitar un tiempo de procesamiento mucho mayor.

Dentro de este grupo de técnicas podemos hablar del *UV casting*, en el cual se aplica el polímero en estado líquido sobre el molde para proceder a continuación a su curado mediante irradiación ultravioleta; o del casting en vacío, para lo cual se crea un molde introduciendo el componente original en un bloque de material plástico, en el que posteriormente se puede inyectar y curar el material de las réplicas.

2.2.5 PCB-MEMS

Una tendencia cada vez más extendida en la fabricación de dispositivos MEMS es el uso de materiales que se consideraban exclusivos de circuitos impresos. Esto se debe a lo económico que resulta utilizar en el proceso de fabricación un sustrato de FR4 en comparación con la tecnología convencional basada en silicio.

El sustrato de los PCBs está compuesto de FR4, una sustancia compuesta por fibra de vidrio y resina epóxica. Los PCBs estándar están compuestos por 8 capas de Prepeg (un material fibroso impregnado con materiales de resina reactiva) y una capa de cobre de 5, 9, 12, 35, 70, 105 o 200 μm . Las capas de Prepeg y el laminado de cobre se prensan bajo presión y temperatura controladas para conformar el material que se utilizará en los procesos de fabricación.

La elección de FR4 como sustrato se debe a su bajo coste económico y su fácil adquisición. Pero, sobre todo, se está expandiendo mucho gracias a su facilidad para ser mecanizado, permitiendo así la posibilidad de realizar prototipos en poco tiempo y con muy bajo coste. Otra ventaja importante a la hora de utilizar este material es la eliminación de la etapa de *wire bonding*. Esto se consigue gracias a las técnicas de fotolitografía y deposición de materiales conductores que permiten establecer continuidad eléctrica entre los MEMS y el cobre, permitiendo de este modo la posibilidad de realizar medidas de pequeños sensores utilizando herramientas clásicas. Además, gracias a la baja conductividad térmica del FR4 se consigue un sustrato muy aislante al paso de calor, haciéndolo muy interesante para aplicaciones donde es necesario realizar transferencias de calor.

Por último, la fácil integración de dispositivos microfluídicos haciendo uso de la tecnología PCB-MEMS en un solo módulo, donde la electrónica y fluídica se conectan directamente mediante pistas de cobre hacen de la tecnología PCB-MEMS una de las más desarrolladas y utilizadas por investigadores para la fabricación de prototipos experimentales a bajo coste.

2.2.6 PDMS y SU-8

En este apartado hablaremos brevemente de las características del PDMS y el SU-8, dos de los materiales poliméricos más extendidos y utilizados en la fabricación de dispositivos MEMS.

2.2.6.1 PDMS

Se trata de un polímero de baja densidad y bajo módulo de Young. Presenta interesantes propiedades para la realización de dispositivos microfluídicos como son su hidrofobicidad y biocompatibilidad, entre otras.

Puede ser tratado de varias formas, mediante grabado húmedo y mediante grabado por plasma para obtener formas determinadas. También se usa para moldeado, mediante el cual se realiza un molde en silicio para posteriormente rellenarlo de PDMS. Finalmente, se retira el molde tras un tratamiento térmico y se obtiene la estructura PDMS, también conocido este método como *soft lithography*.

A continuación, se describen algunas de sus propiedades:

- Es un material transparente, haciéndolo un buen material para aplicaciones ópticas, pues puede observarse el contenido de los microcanales mediante el uso de un microscopio.
- Tiene un bajo nivel de autofluorescencia, por lo que no alterará la longitud de onda de los haces que lo atraviesan.
- Se trata de un material biocompatible. Muy usado en aplicaciones biomédicas y útil para el desarrollo de herramientas de diagnóstico médico para detección óptica de elementos en microfluidos.
- De bajo coste, en comparación con otros materiales empleados en MEMS, y sus procesos de fabricación también lo son.
- Permeable ante gases, lo que nos permite crear canales y microcámaras para almacenar y liberar gases y combinarlos con otros fluidos.
- Es fácil de moldear y muy flexible. Esto nos ofrece el poder de crear dispositivos y circuitos flexibles.

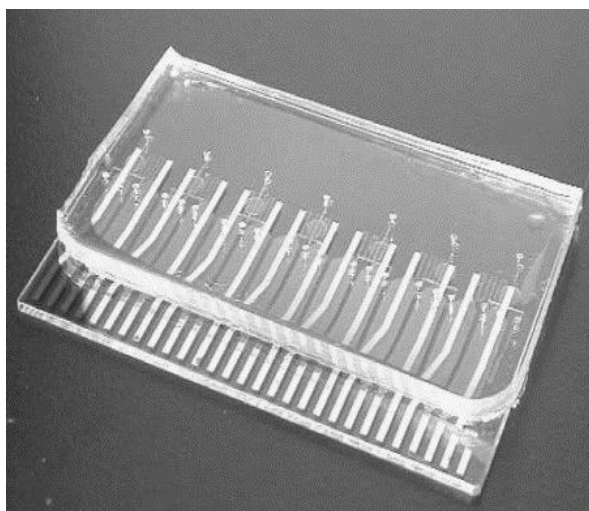


Figura 2-22. Estructura de PDMS con dispositivos de calentamiento y detección

2.2.6.2 SU-8

Se define como una resina *epoxy negative* fotosensible a la radiación ultravioleta, es decir, a una longitud de onda de aproximadamente 365 nm. Es un compuesto formado por la resina epoxy y un disolvente orgánico. El objetivo de dicho disolvente es determinar la viscosidad del SU-8 y deberá ser controlado en función del espesor.

Fue desarrollado y patentado por IBM Watson Research Center (USA) y actualmente es uno de los polímeros más utilizados en la fabricación de microsistemas debido a las interesantes propiedades que posee [19]. Algunas de ellas son las siguientes:

- Se trata de un material biocompatible, lo que lo hace interesante en dispositivos de aplicaciones microfluídicas.
- Es hidrófobo, esta propiedad es importante a la hora de fabricar dispositivos microfluídicos ya que evita que el líquido se pegue a las paredes.
- Buenas propiedades mecánicas y químicas.
- Transparente, haciendo posible observar el movimiento de fluidos.

Gracias a las diferentes técnicas de fabricación, se pueden obtener estructuras complejas como la mostrada en la Figura 2-23. Se trata de un adaptador de fibra óptica realizado mediante la técnica de exposición inclinada. Dicha estructura se puede conseguir aplicándole una determinada inclinación de la radiación ultravioleta.

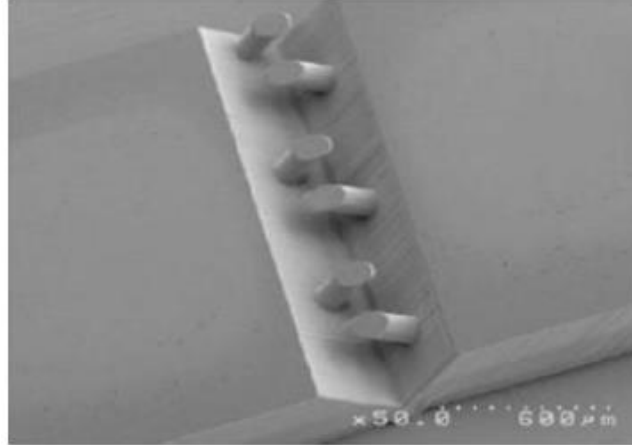


Figura 2-23. Adaptador de fibra óptica realizado con SU-8

3 DISEÑO CONCEPTUAL Y MATERIALES

En este capítulo se explican los principios que rigen el funcionamiento del sistema, así como los materiales y líquidos empleados. Además, se observará el comportamiento de los materiales empleados frente a los distintos líquidos utilizados.

3.1 Diseño conceptual de la microbomba

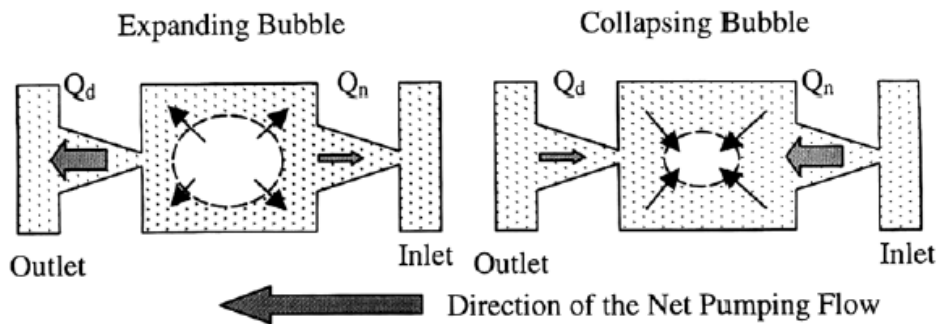


Figura 3-1. Vista superior del principio de expansión y colapso de la burbuja

La Figura 3-1 ilustra el diseño conceptual de la microbomba. La microburbuja es generada por el efecto del paso de corriente eléctrica por el serpentín de cobre, a medida que más corriente circula, más se calienta el cobre y mayor será la temperatura de la muestra líquida, de forma que se genera una burbuja por evaporación. Cuando la temperatura del cobre sea lo suficientemente elevada para expandir el volumen de la cámara la muestra líquida comenzará a desplazarse.

A medida que la burbuja se expande, el flujo de volumen en el difusor, Q_d , es mayor que en la boquilla, Q_n . Cuando la burbuja colapsa, Q_d es más pequeño que Q_n . Además, hay un flujo neto generado desde la boquilla al difusor en cada ciclo de expansión y colapso de la burbuja. El límite de la burbuja funciona como una membrana que “barre” todo el flujo que no ha sido desplazado de la cámara. El diseño de la microbomba no utiliza ninguna válvula mecánica, de manera que el proceso de fabricación se simplifica.

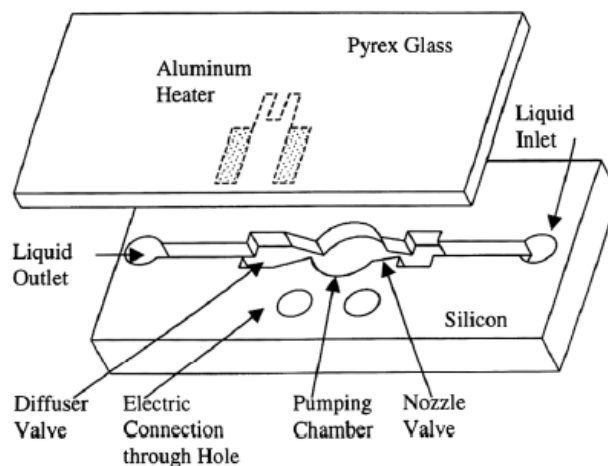


Figura 3-2. Esquemático de la microbomba con el calentador

3.2 Principios fundamentales

A continuación, se explican brevemente dos de los principios fundamentales que intervienen en nuestro sistema y que nos ayudan a entender su funcionamiento.

3.2.1 Ley de Charles

La ley de Charles y Gay-Lussac, frecuentemente llamada ley de Charles o ley de Gay-Lussac, es una de las leyes de los gases ideales. Relaciona el volumen y la temperatura de una cierta cantidad de gas ideal, mantenido a una presión constante, mediante una constante de proporcionalidad directa. En esta ley, Charles dice que, a una presión constante, al aumentar la temperatura, el volumen del gas aumenta y al disminuir la temperatura el volumen del gas disminuye. Esto se debe a que "temperatura" significa movimiento de las partículas. Así que, a mayor movimiento de las partículas (temperatura), mayor volumen del gas.

La ley fue publicada primero por Louis Joseph Gay-Lussac en 1802, pero hacía referencia al trabajo no publicado de Jacques Charles, de alrededor de 1787, lo que condujo a que la ley sea usualmente atribuida a Charles.

La ley de Charles es una de las más importantes leyes acerca del comportamiento de los gases, y ha sido usada de muchas formas diferentes. Se expresa por la fórmula:

$$\frac{V}{T} = k \quad (3 - 1)$$

Si suponemos que tenemos un cierto volumen de gas V_1 que se encuentra a una temperatura T_1 sometido a una presión P_1 al comienzo del experimento y si a presión constante, aumentamos la temperatura del gas hasta un nuevo valor T_2 , entonces el volumen se incrementará hasta V_2 , como se puede observar en la figura 3-3.

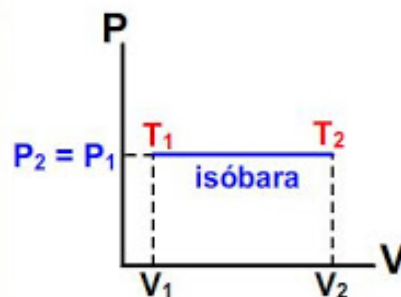


Figura 3-3. Relación entre presión y volumen

El mismo proceso se puede representar en la siguiente Figura 3-4:

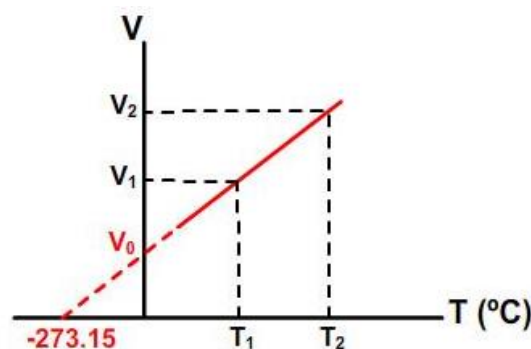


Figura 3-4. Relación entre volumen y temperatura

La recta obtenida en la Figura 3-4 se puede representar matemáticamente como:

$$V = V_0 + \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)t \quad (3 - 2)$$

Donde V_0 es el volumen que ocupa el gas a 0 °C (ordenada al origen) y $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)$ es el cambio de volumen respecto al cambio de temperatura a presión constante (pendiente).

Es posible expresar de la siguiente forma la denominada Ley de Charles:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (3 - 3)$$

Sabiendo que $\Delta V = V_2 - V_1$ y trabajando con la anterior ecuación, se puede llegar fácilmente a la siguiente expresión:

$$\Delta V = V_1 \left(\frac{T_2 - T_1}{T_1}\right) \quad (3 - 4)$$

Resumiendo:

- Siendo la presión constante, si la temperatura aumenta, el volumen lo hará también en la misma proporción.
- Siendo el volumen constante, si la presión aumenta, la temperatura lo hará también en la misma proporción.

3.2.2 Efecto Joule

Fue descubierto por el físico británico James Prescott Joule. Se conoce como efecto Joule al fenómeno irreversible por el cual, si en un conductor circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a las múltiples colisiones que sufren con los átomos del material conductor por el que circulan, elevando la temperatura del mismo.

El enunciado de la Ley de Joule es el siguiente:

El calor producido en un conductor por el paso de la corriente es directamente proporcional a la resistencia, al cuadrado de la corriente y al tiempo que está conectado.

$$E_{calor} = I^2 R t \quad (3 - 5)$$

Donde E_{calor} se mide en julios.

El efecto Joule nos sirve para explicar y entender el comportamiento del serpetín de cobre, ya que será sometido al paso de corriente eléctrica durante un tiempo concreto y por tanto, su temperatura aumentará actuando como calentador. La Ley de Charles explica el comportamiento de lo que ocurre en la microbomba. Cuando la temperatura del calentador es lo suficientemente elevada para expandir el volumen de la cámara y ejercer una presión sobre la muestra líquida que hará que comience a desplazarse.

3.3 Materiales y líquidos empleados

En este punto se enuncian las propiedades de los materiales y líquidos empleados. Tras observar el comportamiento de los materiales con los líquidos se procede a la elección del material con el que construiremos nuestro sistema.

3.3.1 Metacrilato PMMA

Dentro de los plásticos de ingeniería podemos encontrarlo como polimetilmetacrilato, también conocido por sus siglas PMMA. La lámina de acrílico se obtiene de la polimerización del metacrilato de metilo y la presentación más frecuente que se encuentra en la industria del plástico es en gránulos o en láminas. Los gránulos son para el proceso de inyección o extrusión y las láminas para termoformado o para mecanizado.

Compite en cuanto a aplicaciones con otros plásticos como el policarbonato (PC) o el poliestireno (PS), pero el acrílico se destaca frente a otros plásticos transparentes en cuanto a resistencia a la intemperie, transparencia y resistencia al rayado.

Entre sus **propiedades** destacan:

- Transparencia alrededor del 93%. El más transparente de los plásticos.
- Alta resistencia al impacto, de unas diez a veinte veces la del vidrio.
- Excelente aislante térmico y acústico.
- Ligero en comparación con el vidrio (aproximadamente la mitad), con una densidad de unos 1190 kg/m^3 es sólo un poco más pesado que el agua.
- De dureza similar a la del aluminio: se raya fácilmente con cualquier objeto metálico.
- No desprende gases tóxicos al arder.
- Gran facilidad de mecanización y moldeo.
- Fácil manipulación. No se dobla en frío.
- Presenta gran resistencia al ataque de muchos compuestos, pero es atacado por otros.
- Temperatura de transición vítrea¹ en torno a $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.3.2 Poliestireno (*styroglass*)

El poliestireno es un polímero que se obtiene a partir del monómero de estireno. Es un plástico que se encuentra disponible en una amplia variedad de grados que corresponden a diferentes métodos de fabricación y formulación con diversos tipos de aditivos.

La polimerización del estireno puro da como resultado un poliestireno puro que es un sólido incoloro, rígido, frágil y con flexibilidad limitada. A este poliestireno puro se lo denomina “poliestireno cristal”. Por debajo de los $95 \text{ }^\circ\text{C}$, el poliestireno cristal es vítreo, por encima de esa temperatura se reblandece y puede moldearse.

Es de estructura amorfa y se considera uno de los plásticos de mayor transparencia y brillo en la superficie. Sin embargo, también presenta alta rigidez y fragilidad. Es considerado también como uno de los plásticos de más fácil procesamiento. No requiere secado y presenta mínimas contracciones de moldeo.

De baja densidad, duro, transparente, con buenas propiedades ópticas, mínima absorción de agua, buena estabilidad dimensional y aislamiento eléctrico. Tiene baja resistencia al impacto, estabilidad térmica y es resistente a ácidos orgánicos e inorgánicos concentrados.

¹ La temperatura de transición vítrea es la temperatura en la cual los polímeros se reblandecen. Pasan de un estado duro-rígido a un estado más elástico-flexible.

3.3.3 Elección de material y líquido

Tras realizar una comparación de las propiedades de ambos materiales se llega a la conclusión de que ambos son muy parecidos ya que los dos son transparentes, rígidos, de fácil manipulación y con una temperatura de transición vítrea entorno a 100 °C por lo que a priori cualquiera de los dos sería valido para la fabricación de nuestro sistema.

Para estudiar el comportamiento de los materiales frente a los líquidos, ambos serán expuestos al vapor de agua e isopropanol (IPA) ya que el buen funcionamiento de la microbomba dependerá de la reacción de estos materiales a la exposición de dichos gases.

A priori, el isopropanol parece mejor elección ya que su punto de ebullición se encuentra aproximadamente a 80 °C y el del agua a 100 °C. De este modo, con el isopropanol conseguimos la formación de la burbuja a una temperatura menor y evitamos así tener problemas posteriores con el pegado del material a la placa.

Al exponer el metacrilato a vapor de isopropanol se observa que dicho gas erosiona la superficie del material (Figura 3-5). Esto provocaría variaciones en el volumen de la microcámara y dejaría de ser transparente tras un solo uso por lo que se descarta dicha combinación de material/líquido.



Figura 3-5. Metacrilato antes de ser expuesto a vapor de IPA (izquierda) y después (derecha).

En cambio, al exponer el poliestireno a vapor de isopropanol, se observa que la superficie donde colisionan los gases se mantiene intacta. Tras su exposición en repetidas ocasiones sigue siendo transparente y no se ha erosionado.

Como era de esperar, al exponer a ambos materiales a vapor de agua la superficie no se erosiona en ninguno de ellos, pero se tienen que llegar a temperaturas muy altas para la formación de la burbuja que provocarían daños irreversibles en el pegado.

La elección del material que se ha realizado para la fabricación de la microbomba es el poliestireno (styroglass) por su buen comportamiento frente al vapor de IPA.

4 PROCESO DE FABRICACIÓN

En este capítulo se detallan los diferentes procesos de fabricación que se han llevado a cabo para la realización del sistema. En primer lugar, se describen los pasos necesarios para el diseño y la fabricación de las máscaras de los calentadores y de la estructura de poliestireno, posteriormente la fabricación del PCB y por último, el proceso de fabricación de la estructura de poliestireno.

Todos los procesos han sido llevados a cabo en la sala blanca de los laboratorios del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Sevilla donde los niveles de contaminación son bajos.

4.1 Diseño y fabricación de máscaras

El diseño de las máscaras se realiza con una herramienta CAD llamada L-Edit. Este software es apropiado para el diseño de *layouts* de circuitos integrados y para el diseño de máscaras en microsistemas.

El diseño que se propone en este proyecto de la parte microfluídica del sistema es una réplica del diseño publicado en el artículo *A Thermal-Bubble-Actuated Micronozzle-Diffuser Pump* por Jr-Hung Tsai y Liwei Lin (miembros del IEEE) en *Journal of microelectromechanical systems* [15]. Dicha fabricación se llevo a cabo con SU-8, sustrato de silicio usando DRIE (*Deep Reactive Ion Etching*) y vidrio. En cambio, nuestra idea es hacerlo más barato y con tecnologías de producción masiva, que no es el caso del SU-8.

4.1.1 Diseño máscara estructura microfluídica

El diseño que se propone es el que se muestra en la Figura 4-1. Como se observa, consta de una cámara central donde se forma la burbuja unida a un puerto de entrada y otro de salida a través de microcanales y toberas.

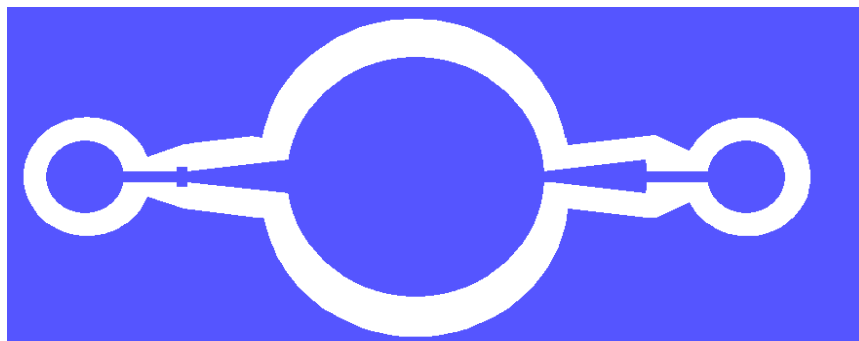


Figura 4-1. Estructura microfluídica

Como se comentó anteriormente el diseño es una réplica del diseño publicado en el artículo *A Thermal-Bubble-Actuated Micronozzle-Diffuser Pump* [15] aunque se deben multiplicar por 4 las dimensiones debido al cambio de materiales utilizados y los procesos de fabricación empleados.

Por tanto, la dimensión para la cámara circular es de 10 mm de diámetro y está conectada a dos

toberas de 4 mm de largo y 1400 μm de ancho en su parte más amplia, y 400 μm en su parte más estrecha. El ángulo divergente de las toberas es de 14° . Por otro lado, la longitud de los canales es de 2,5 mm con una anchura de 400 μm que conectan con el puerto de entrada y salida cuyo diámetro es de 3 mm. La profundidad de las cámaras, canales, toberas y puertos es de 105 μm . El volumen de la cámara es por tanto de 8,25 μl .

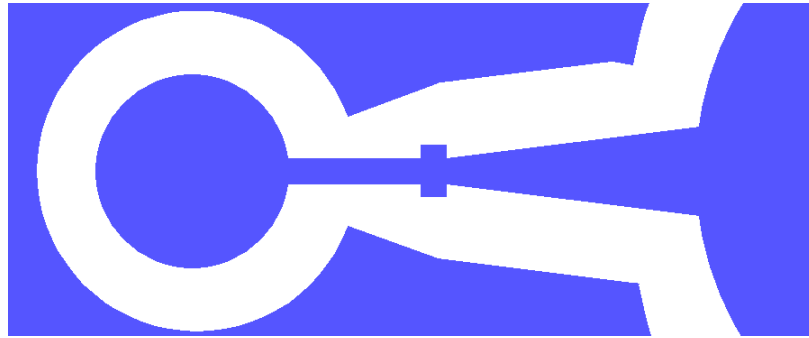


Figura 4-2. Detalle tobera de salida

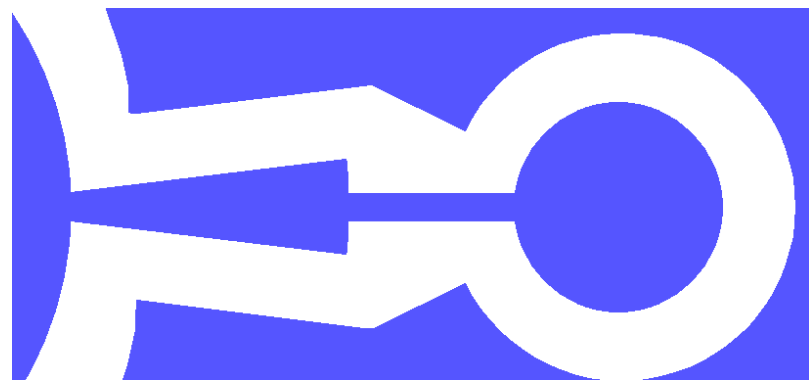


Figura 4-3. Detalle tobera de entrada

4.1.2 Diseño máscara calentador

Las dimensiones de los calentadores vienen determinadas por el diámetro de la cámara. Queremos que abarque toda la cámara y que alcance su temperatura máxima en la parte central para que la burbuja aparezca lo más centrada posible. Por tanto, la anchura y altura máxima es de 9 mm y los pads donde se conectará la tensión de 2x2 mm. Se diseñan calentadores en forma de serpentín de 150 μm de ancho de pista y separación entre ellas y de 100 μm de ancho de pista y separación entre ellas.

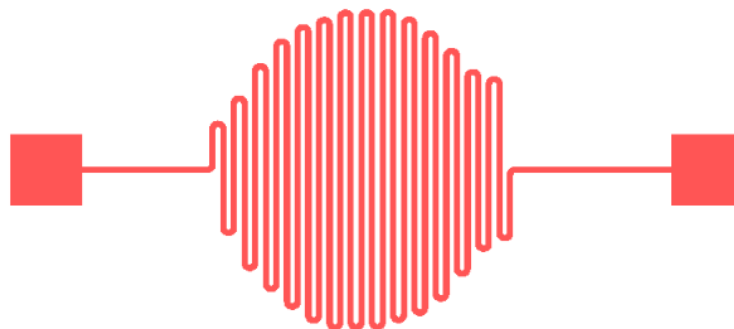


Figura 4-4. Calentador de 150 μm de ancho de pista y separación entre ellas

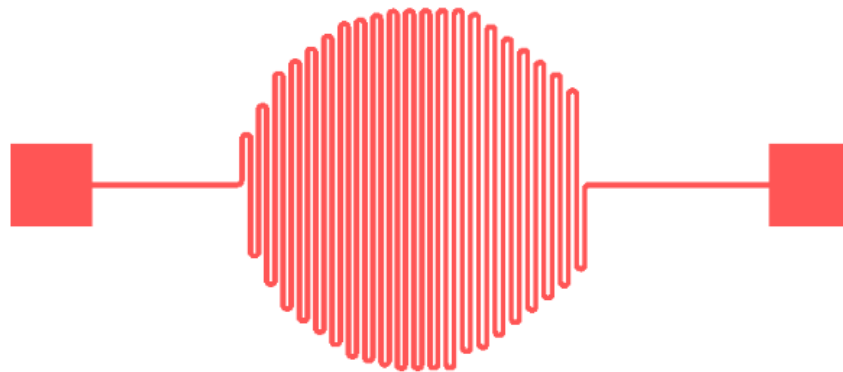


Figura 4-5. Calentador de 100 μm de ancho de pista y separación entre ellas

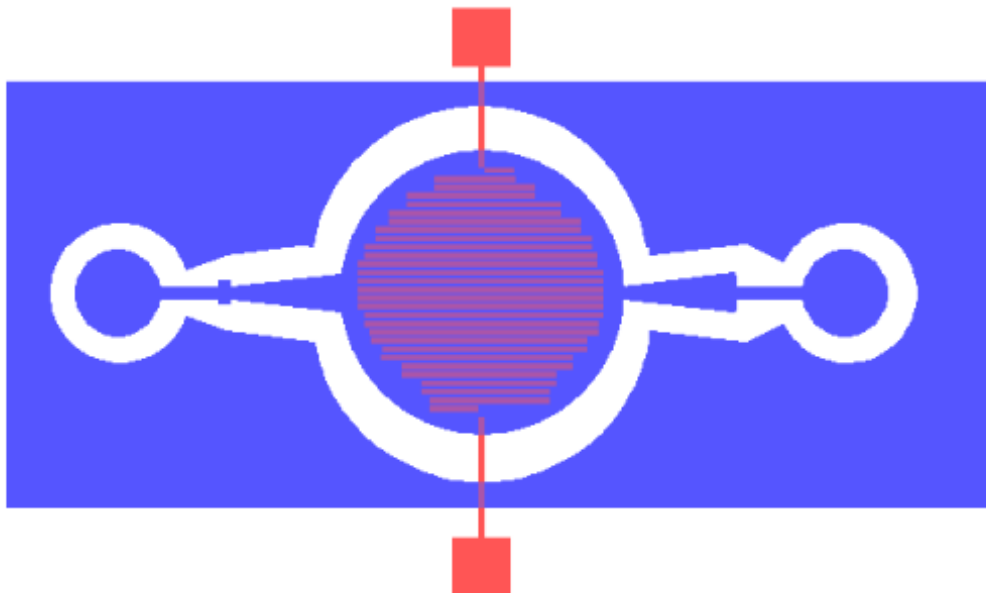


Figura 4-6. Superposición del calentador y circuito microfluídico

4.1.3 Fabricación de máscaras

Las máscaras se fabrican usando un Photoplotter como el que se muestra en la Figura 4-7 con fotolitos sensibles en el rango de la luz roja. En nuestro caso, para ambas máscaras queremos que la parte dibujada sea el área negra de la máscara, por tanto, debemos deseleccionar la opción de transferir el fotolito a la imagen inversa. Antes, debemos realizar una serie de pasos intermedios para convertir el archivo generado por L-Edit al formato de archivo adecuado que recibe el Photoplotter para su posterior impresión.



Figura 4-7. Photoplotter utilizado en la fabricación de máscaras

En primer lugar, mediante el software L-Edit se exporta el archivo en formato .gds, para ello se selecciona la opción `file` → `export mask data` → `export`. Posteriormente, el archivo en formato .gds será transformado a .gerber mediante el programa Linkcad. A continuación, el archivo .gerber se convertirá a .fpf mediante el software Convert Gerber into bitmap, para ello importamos el archivo .gerber y lo exportamos habiendo seleccionado la ley y la resolución deseada. En nuestro caso, seleccionamos Lay_1 y una resolución de 4064 píxeles por pulgada. Para comprobar que la máscara que vamos a imprimir es la deseada es recomendable abrir el archivo con extensión .fpf con el programa View FPF. Por último, se ejecuta el software Run Photoplotter via USB, seleccionamos la resolución que anteriormente hayamos elegido y en nuestro caso deseccionamos la negative option.

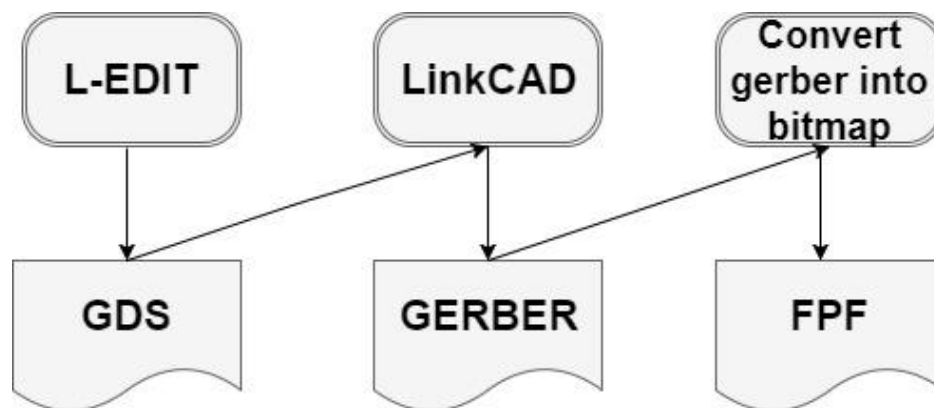


Figura 4-8. Conversión de .gds a .fpf

Una vez realizada toda la configuración del Photoplotter, se procede a apagar las luces de la sala blanca, incluido el monitor, y únicamente se deja encendida una luz verde que no afecta al fotolito donde se grabará la máscara. A continuación, se recorta un trozo de fotolito de una dimensión algo mayor a la de la máscara y se detecta qué cara del fotolito es más oscura, ya que ésta es la que debe colocarse con cinta adhesiva al torno del Photoplotter hacia fuera.

Tras bajar la tapa superior del Photoplotter, encendemos las luces de la sala blanca, así como la pantalla del monitor y seleccionamos la opción `plot` para comenzar la impresión de la máscara. La duración de la impresión es variable ya que depende de la resolución seleccionada y del tamaño de la máscara, en nuestro caso el proceso de impresión para ambas máscaras dura aproximadamente 35 minutos.

Una vez finalizada la impresión de la máscara se prepara un recipiente con líquido revelador y otro recipiente con líquido fijador. A continuación, se apagan de nuevo las luces y se sumerge la máscara durante un minuto en el recipiente del líquido revelador. Transcurrido dicho tiempo se lava con agua durante otro minuto y posteriormente se introduce en el recipiente del líquido fijador en el que permanecerá un minuto y medio. Por último, se vuelve a lavar con agua y se deja secar.

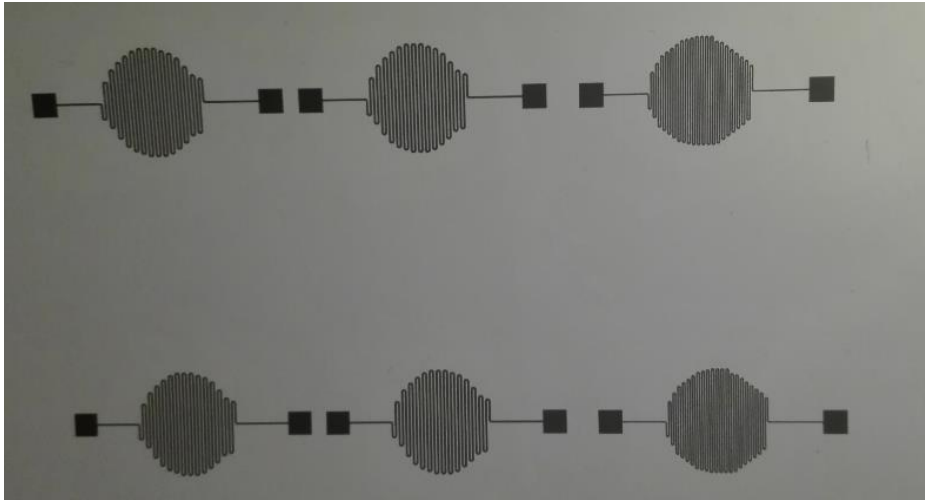


Figura 4-9. Resultado de la fabricación de la máscara de los calentadores

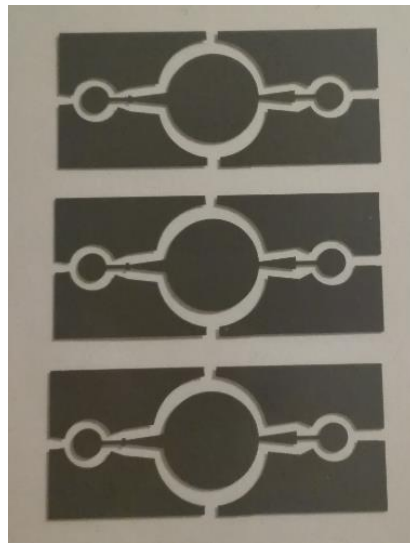


Figura 4-10. Resultado de la fabricación de la máscara del circuito microfluídico

4.2 Fabricación de calentadores de cobre

Se trata de una placa PCB formada por una fibra rígida de vidrio (FR4). Para la placa de los calentadores se elige una placa de PCB con un grosor del FR4 de 1,5 mm y una lámina de cobre de 5 μm . Se corta un trozo de 7x7 mm de la placa y se liman los bordes y rebabas producidas por el corte, ya que que estos bordes irregulares pueden afectar negativamente al proceso de fabricación.

Una vez cortada la placa, se limpia en primer lugar con acetona y posteriormente con IPA. A continuación, se deposita una resina en spray y se deja calentar 5 minutos a 70 °C. Una vez la placa se enfríe, se posiciona en la alineadora que será la encargada de exponer a luz ultravioleta (UV) la

resina fotosensible de la placa. La máscara actúa de barrera frente a la exposición de la luz UV, permitiendo que la luz penetre únicamente por las zonas donde no hay color negro y por tanto, debilitándose únicamente la resina expuesta.

El tiempo total de insolación para del diseño es de 160 segundos, repartido en 8 pasos de 20 segundos de exposición con 10 segundos de espera entre cada paso.



Figura 4-11. Alineadora de máscaras

Tras realizar el proceso de insolación se sumerge la placa en un recipiente con líquido revelador y se espera a que aparezca el esquema de la máscara para después limpiar la placa con agua abundante. Con este paso se consigue eliminar toda la resina fotosensible expuesta a la luz ultravioleta, quedando únicamente la capa de cobre. A continuación, para eliminar el cobre que no está protegido por la resina, se introduce la placa en una disolución de ácido con la que comienza la fase de atacado del cobre. La disolución será de 100 ml y se compone por un 25 % de HCl, un 25 % de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y un 50 % de agua. La placa estará sumergida en la disolución el tiempo necesario para eliminar el cobre no deseado, para ello se realizan comprobaciones periódicas para observar como se produce el atacado del cobre. Cuando se observe el esquema deseado se vuelve a limpiar el PCB con agua para eliminar la resina restante del cobre.

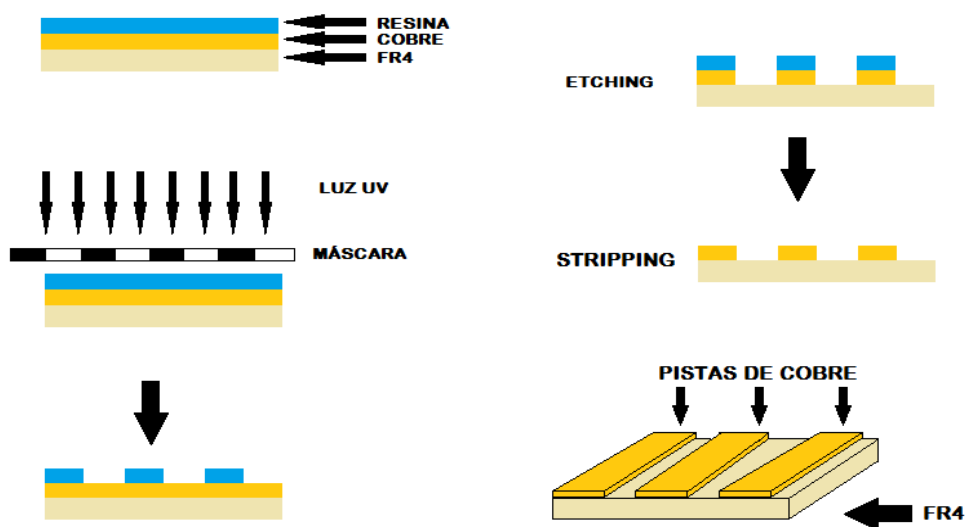


Figura 4-12. Fases para la fabricación de PCBs

Una vez construido el PCB se observa con el microcópico el resultado de la fabricación de la placa, comprobando que las pistas no estén cortocircuitadas y que el resultado de la fabricación sea el deseado. El resultado de la fabricación del PCB de los calentadores se observa en las Figuras 4-13 y 4-14.

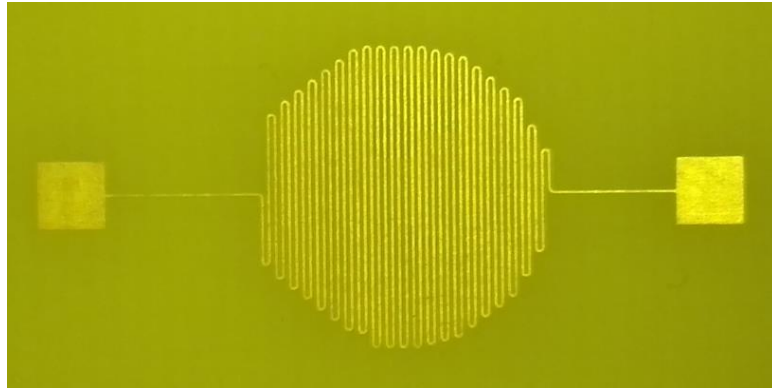


Figura 4-13. Calentador de 100 μm

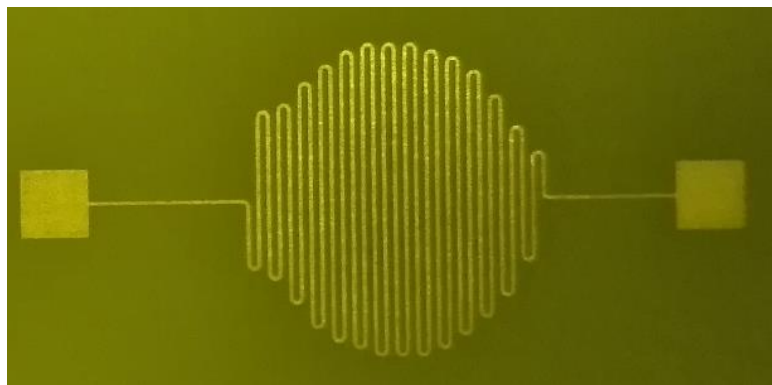


Figura 4-14. Calentador de 150 μm

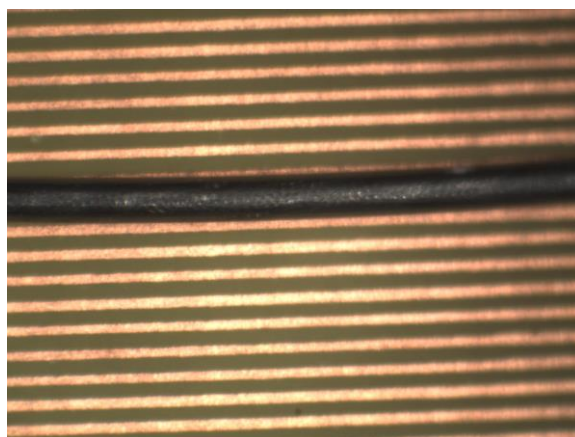


Figura 4-15. Detalle del PCB con un cable de 360 μm de diámetro

4.3 Fabricación del dispositivo microfluídico mediante hot embossing

El dispositivo de poliestireno (PS) será fabricado usando la técnica de estampado de precisión en caliente o más conocida como *hot embossing*. En comparación con otras técnicas de replicado es una tecnología con un relativo bajo coste de las herramientas de estampación, simplicidad y rapidez del proceso y una alta precisión en el conformado de piezas pequeñas. Sin embargo, tiene el inconveniente de generar tensiones residuales elevadas.

Este proceso se basa en el flujo plástico de un material alrededor de un molde de geometría inversa a la pieza deseada. En primer lugar, el material se calienta hasta un punto intermedio entre la temperatura de transición vítrea y la temperatura de fusión, y después con la ayuda de una prensa se presiona la pieza uniaxialmente. La prensa hidráulica de la que se hace uso en los laboratorios es capaz de generar una fuerza de estampado de 11 toneladas, fuerza más que suficiente para el estampado que necesitamos.

4.3.1 Fabricación del molde de PCB

Para la fabricación del molde de PCB se escoge una placa con un grosor de FR4 de 1,5 mm y una lámina de cobre de 105 μm . El grosor de lámina de cobre es mayor que la de los calentadores ya que dicho grosor determinará la profundidad de la cámara, canales y toberas.

El proceso de fabricación del molde de PCB es el mismo que se ha explicado para la fabricación de los calentadores de cobre en el apartado 4.2 por lo que a continuación se realiza un resumen del proceso comentando las diferencias.

En primer lugar, se corta un trozo de 7x7 mm de la placa y se liman las rebabas producidas por el corte. Posteriormente se limpia la placa con acetona e IPA y se deposita una resina en spray sobre la superficie de la placa. A continuación, la placa con la resina se calienta 5 minutos a 70 °C y una vez se enfríe se puede comenzar con el proceso de insolación.

Para proceder con la insolación de la placa, posicionamos la placa en la alineadora e insolamos en 8 pasos de 20 segundos de exposición con 10 segundos de espera entre cada paso, resultando un tiempo total de insolación de 160 segundos.

Tras realizar el proceso de insolación se sumerge la placa en un recipiente con líquido revelador y se espera a que aparezca el esquema de la máscara para después limpiar la placa con agua abundante. A continuación, para eliminar el cobre que no está protegido por la resina, se introduce la placa en una disolución de ácido con la que comienza la fase de atacado del cobre. La disolución será de 100 ml y se compone por un 25 % de HCl, un 25 % de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y un 50 % de agua. Destacar que el tiempo de atacado del cobre es mayor para la fabricación del molde PCB del dispositivo microfluídico que el de la fabricación de los calentadores, ya que el grosor de la lámina de cobre utilizada en este caso es de 105 μm frente a la lámina de 5 μm utilizada anteriormente. Por último, cuando se observe el esquema deseado se vuelve a limpiar el PCB con agua para eliminar la resina restante del cobre.

Una vez construido el PCB se comprueba que el resultado de la fabricación sea el deseado. El resultado de la fabricación del molde de PCB del circuito microfluídico se observa en la Figura 4-16.



Figura 4-16. Molde de PCB

Como se observa en la Figura 4-16, existen 4 aperturas por dispositivo necesarias para la evacuación del aire durante el proceso de *hot embossing*. Sin estas aperturas, el aire quedaría confinado en la cavidad y no se fabricarían las paredes correctamente.



Figura 4-17. Detalle molde de PCB con cable de 360 μm de diámetro

4.3.2 Hot embossing

Una vez fabricado el molde en PCB explicado en el capítulo anterior, se procede a cortar un trozo del material polimérico a usar que en nuestro caso se trata de poliestireno, de un tamaño tal que quepa el el diseño realizado dentro de él, pero menor que el molde para que no sobresalga por sus bordes. Una vez cortado, se deben limar las rebabas surgidas en el corte para evitar que puedan levantar la pieza sobre el molde y, por tanto, producirse una mala estampación.

A continuación, se configura la prensa para el proceso. Como se ha comentado anteriormente, se debe precalentar la máquina encargada de realizar el *hot embossing* a un punto intermedio entre la temperatura de transición vítrea y la de fusión. En el caso de poliestireno, la máquina se debe precalentar a 110 °C.



Figura 4-18. Temperaturas máquina *hot embossing*

Una vez la máquina haya alcanzado la temperatura deseada, se coloca el molde PCB sobre la plancha inferior lo más centrado posible para que la fuerza que se aplique sea lo más homogénea posible. Posteriormente se coloca el poliestireno cortado anteriormente sobre el molde y se cierra la prensa de la máquina hasta el punto de que el poliestireno toque la plancha superior sin aplicarle ninguna presión. En este punto lo dejamos aproximadamente 30 segundos para que la pieza polimérica y la placa alcancen la misma temperatura de las planchas.



Figura 4-19. Poliestireno colocado sobre el molde PCB en la prensa

Posteriormente se aplica una presión de 3,125 kPa durante 3 minutos. La máquina utilizada no tiene indicador de presión sino de la fuerza total aplicada, por tanto, debemos convertir de presión a fuerza para saber la fuerza que se le aplica a la pieza de poliestireno en todo instante. Para realizar dicha conversión, únicamente debemos saber el área de la pieza y hacer uso de la ecuación 4-1.

$$F = pA \quad (4 - 1)$$

El área de cada pieza de poliestireno es de 5,1 cm^2 que multiplicada por 3 da un total de 15,3 cm^2 . Aplicando la ecuación 4-1 obtenemos que la fuerza a aplicar es de 478 libras por pulgada cuadrada (psi) tal como se observa en la figura 4-20.

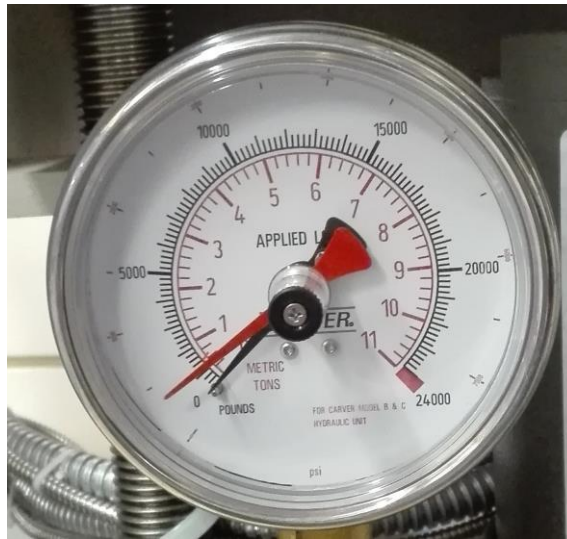


Figura 4-20. Fuerza aplicada por la prensa

Durante el proceso, la pieza de poliestireno se irá deformando y la fuerza aplicada irá disminuyendo por lo que es necesario ir reajustando la fuerza aplicada continuamente para mantener el valor de fuerza deseado.

Transcurridos los 3 minutos, se deja de aplicar fuerza sobre la pieza y comienza el proceso de enfriamiento del poliestireno. Para aligerar el tiempo del proceso se conectan ventiladores que refrigeran la máquina. Una vez que la temperatura haya bajado de los 75 °C procedemos a retirar el molde PCB con la pieza de poliestireno de la máquina sin peligro de que se deforme. Por último, se separa la pieza del molde con cuidado de no doblarlo para así poder reutilizarlo en otra ocasión si fuese necesario y se taladra la entrada y salida.



Figura 4-21. Circuito microflúidico

4.4 Pegado del PCB con el circuito microflúidico

El proceso de pegado que se ha realizado para pegar el circuito microflúidico con el PCB es un proceso de pegado por *stamping*. Para ello hemos utilizado pegamento epoxy EPO-TEK 301B y un set de rodillos que permite la deposición de una capa micrométrica de espesor.

Los pasos seguidos para llevar a cabo el proceso de pegado son los siguientes:

1. Se limpia la placa PCB con acetona para eliminar cualquier residuo que pudiese haber sobre la superficie y que afecte negativamente al proceso de pegado.

2. Se realiza una mezcla 4:1 en peso de los botes de pegamento mostrados en la Figura 4-22. Para ello hacemos uso de una báscula de precisión y mezclamos 0.25 g del bote negro y 1 g del bote blanco.



Figura 4-22. Pegamento epoxy EPO-TEK 301B

3. Se mezcla con una varilla durante 1 minuto aproximadamente para que la mezcla quede lo más homogénea posible.
4. Se introduce la mezcla durante 10 minutos en una cámara de vacío como la mostrada en la Figura 4-23 para eliminar las burbujas que se hayan generado en el mezclado.



Figura 4-23. Cámara de vacío

5. Se deposita una gota alargada de pegamento sobre una superficie lisa. En nuestro caso sobre el cobre de un PCB vírgen.
6. Se extiende el pegamento con un rodillo que deja una capa de 20 μm de espesor.
7. Se coloca la pieza de poliestireno sobre la capa de pegamento extendida y se retira la pieza cuando las bases de las paredes estén impregnadas de pegamento.

8. Se coloca la pieza impregnada de pegamento sobre la placa PCB que tiene los serpentines de cobre. Este paso se debe realizar con precaución ya que hay que alinear la pieza de poliestireno con el calentador para que este quede dentro de la cámara.
9. Se aplica presión con una pinza para favorecer el contacto entre el PCB y la pieza de poliestireno, y así se consigue que el pegamento haga que no haya fugas entre las partes que se quieren pegar.
10. Por último, se deja ejerciéndose presión un día a temperatura ambiente.

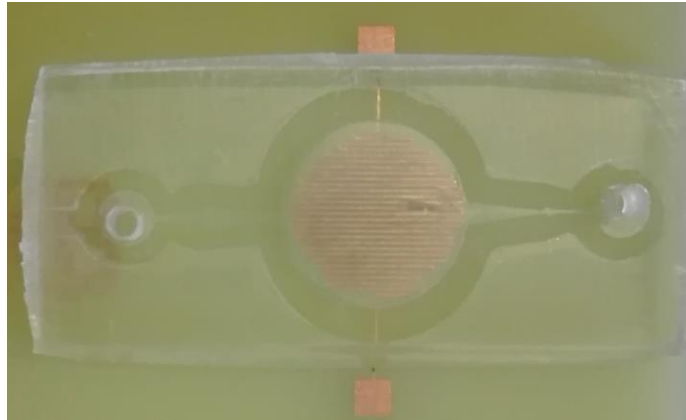


Figura 4-24. Pieza de poliestireno pegada sobre el PCB

5 CARACTERIZACIÓN PREVIA DE PARÁMETROS FUNCIONALES

En este capítulo se caracterizan y analizan los dos calentadores fabricados en el punto anterior y se detallan los parámetros obtenidos para la generación de la burbuja. Además, se encuentra el rango de funcionamiento en el cual se tiene control sobre la vibración de la burbuja.

5.1 Caracterización de los calentadores

Para el cálculo de las resistencias a temperatura ambiente de ambos calentadores puede usarse la siguiente ecuación:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (5 - 1)$$

Donde ρ es una constante conocida que depende del material, llamada resistividad. L , es el largo o longitud (en metros) del cable o conductor, y S es la sección o grosor (en mm^2) del cable o conductor.

En nuestro caso realizamos el cálculo de la resistencia experimentalmente con la ayuda del multímetro por ser un método más fácil y rápido de obtener el valor.

Como se vio en el capítulo anterior, se han fabricado calentadores de $100 \mu m$ y $150 \mu m$ de ancho de pistas y separación entre ellas obteniéndose los siguientes valores de resistencia:

- Calentador de $150 \mu m \rightarrow 5,5 \Omega$
- Calentador de $100 \mu m \rightarrow 11 \Omega$

A continuación, se procede a realizar un estudio de cada uno de los calentadores para observar su comportamiento con la temperatura. Para ello, hacemos pasar diferentes corrientes por los serpentines de cobre observando como varía la temperatura y que valores se alcanzan. Entre cada medida realizada se ha dejado el tiempo suficiente para que el calentador alcanzase la temperatura máxima con el valor de corriente aplicado. En las siguientes tablas y figuras pueden observarse los resultados del análisis.

5.1.1 Calentador de $150 \mu m$

Temperatura (°C)	Intensidad (mA)
25	0
27,2	50
28,5	100
31,2	150
35,6	200

39,1	250
47	300
54,8	350
65,2	400
80,5	450

Tabla 5-1. Temperatura en función de la corriente (pistas de 150 μm)

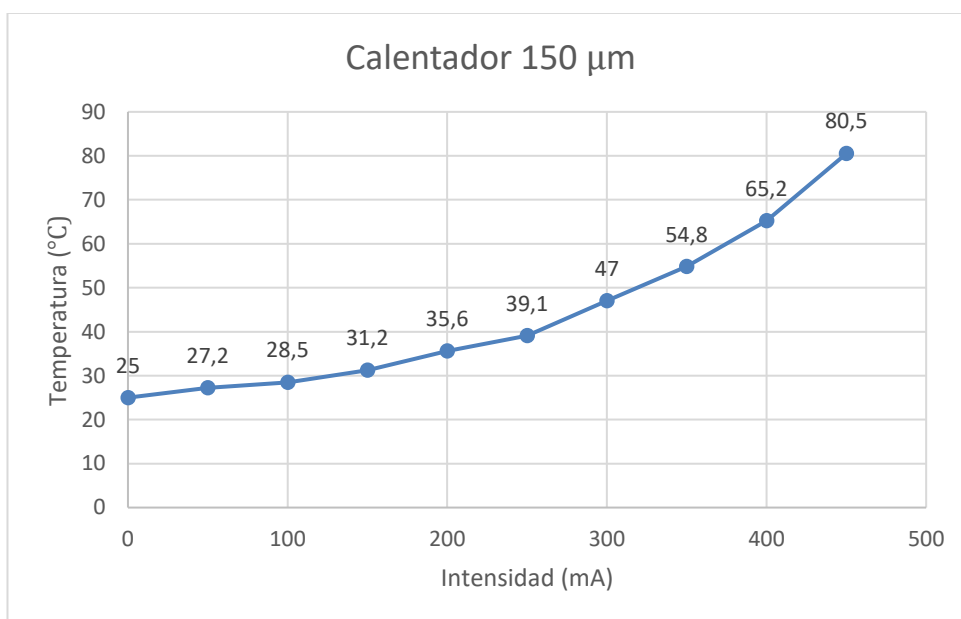


Figura 5-1. Gráfica de la temperatura en función de la corriente (pistas de 150 μm)

Como se puede observar en la gráfica anterior, el calentador alcanza la temperatura de los 82 °C, temperatura de ebullición del isopropanol, para una corriente superior a los 450 mA.

5.1.2 Calentador de 100 μm

Temperatura (°C)	Intensidad (mA)
25	0
28,3	50
32,7	100
40,8	150
55,4	200
77,3	250

96,5	300
128,5	350

Tabla 5-2. Temperatura en función de la corriente (pistas de 100 μm)

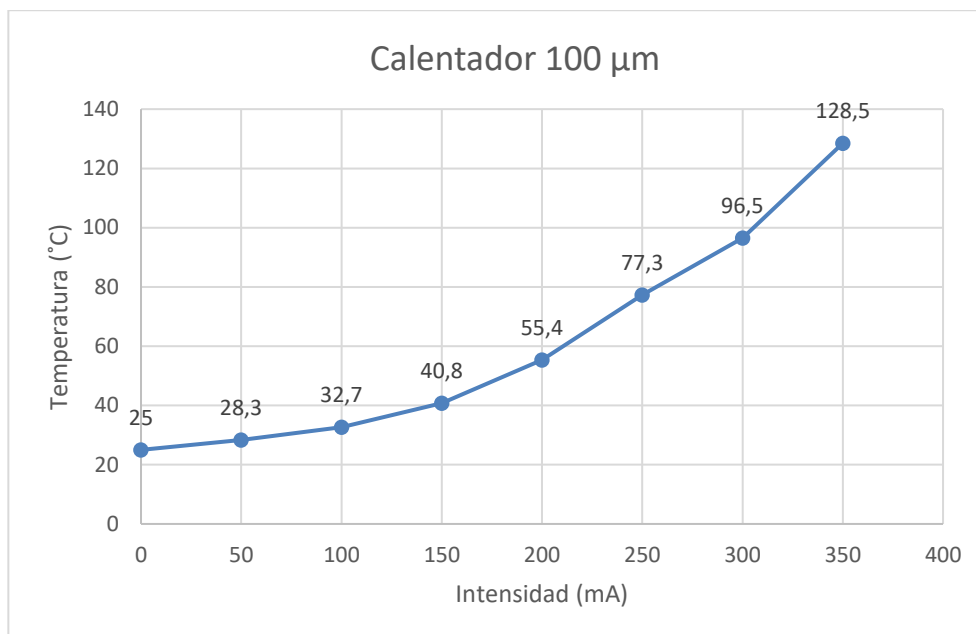


Figura 5-2. Gráfica de la temperatura en función de la corriente (pistas de 100 μm)

Como se observa en la Figura 5-2, el calentador alcanza la temperatura de ebullición del isopropanol a una corriente de 275 mA aproximadamente.

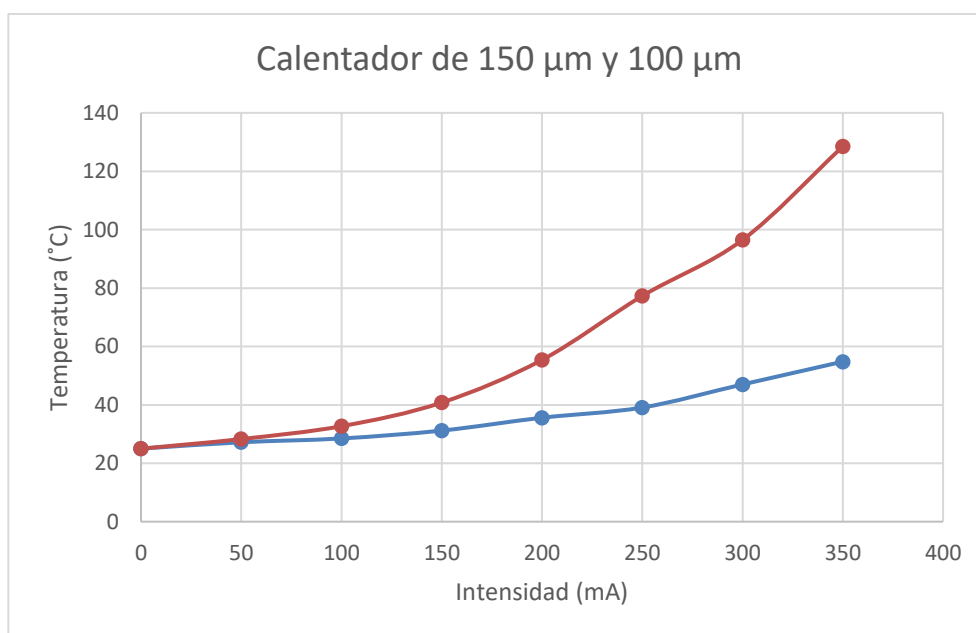


Figura 5-3. Gráfica combinada del calentador de 150 μm y 100 μm

Tras analizar las curvas de ambos calentadores, se observa como era de esperar que el calentador de $100\ \mu\text{m}$ de ancho de pistas calienta más rápido que el de $150\ \mu\text{m}$ ya que su resistencia es mayor, y por tanto necesita menos corriente para alcanzar la temperatura de ebullición del isopropanol. Por tanto, el calentador elegido para realizar las pruebas experimentales será el de $100\ \mu\text{m}$.

5.2 Parámetros para la generación de la burbuja

En este apartado se realizan diversas pruebas para detectar el tiempo transcurrido hasta la aparición de la burbuja y además, se obtendrá la corriente mínima y máxima necesaria que tiene que circular por los serpentines de cobre para poder tener el control de la vibración de la burbuja.

Tras la realización de varias pruebas se obtiene que el tiempo de aparición de la burbuja son 15 segundos aproximadamente desde que se le empieza a aplicar una corriente de $0,25\ \text{A}$ al calentador. La aparición de la burbuja se puede conseguir en menor tiempo aplicándole una corriente más elevada al serpentín, pero con el inconveniente de que una vez se forma la burbuja esta se expande rápidamente sin poder tener el control sobre ella.

Una vez formada la burbuja por evaporación del isopropanol en el interior de la microcámara se le aplican diferentes corrientes al calentador para analizar la expansión y colapso de la burbuja. Se observa que se puede tener el control de la vibración de la burbuja para unos valores comprendidos entre los $0,2\ \text{A}$ y los $0,3\ \text{A}$. Por encima de los $300\ \text{mA}$, el calentador alcanza una temperatura muy elevada haciendo que la burbuja se expanda rápidamente sin poder tener el control sobre ella. Para una corriente de $0,2\ \text{A}$ la burbuja se mantiene en estado de reposo y por debajo de dicho valor es invariante a los cambios de corriente. Por tanto, el rango de corrientes donde se puede tener el control del colapso y expansión de la burbuja se encuentra entre los $0,2\ \text{A}$ y $0,3\ \text{A}$.

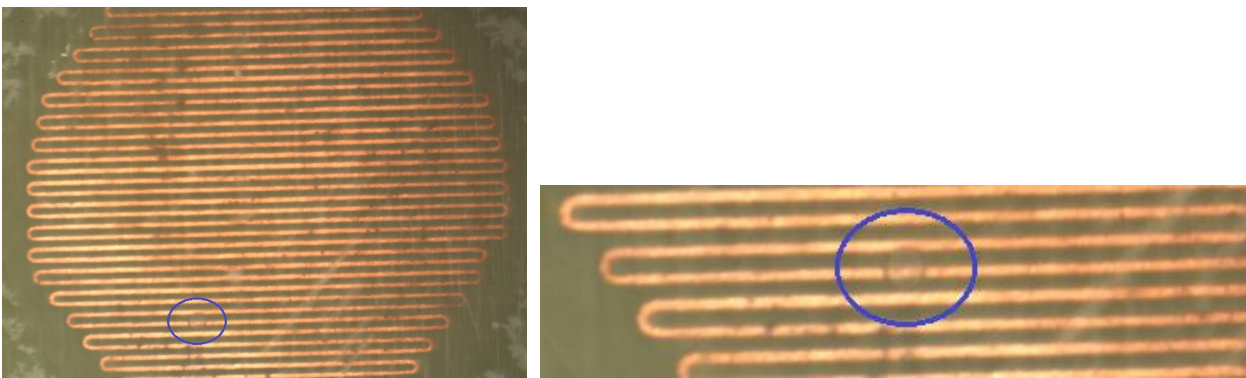


Figura 5-4. Aparición de la burbuja

6 CIRCUITO ELECTRÓNICO

Con los datos obtenidos en el capítulo anterior se aborda el diseño del circuito electrónico capaz de provocar la expansión y colapso de la burbuja dentro de los límites encontrados sobre los se tiene el control de la vibración de la burbuja.

En primer lugar, se hará un estudio teórico del circuito electrónico a implementar para posteriormente realizar una simulación en Microcap y así cerciorarnos de que el funcionamiento es el deseado. A continuación, se realizará una elección de los componentes en función de la potencia disipada, corrientes y temperaturas máximas que son capaces de soportar entre otros parámetros. Por último, se monta el circuito en una placa de pruebas como prueba del prototipo y se realiza la fabricación del circuito en PCB.

6.1 Diseño del circuito

Queremos un circuito que sea capaz de variar la corriente entre 0,2 A y 0,3 A que circula por el calentador ya que dentro de este rango tenemos el control sobre la vibración de la burbuja. El circuito que se propone se muestra en la Figura 6-1.

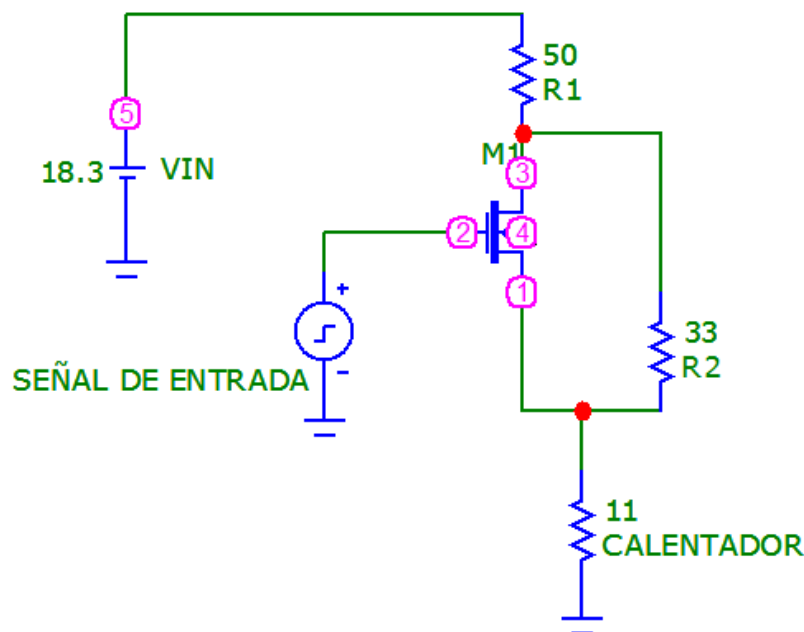


Figura 6-1. Circuito electrónico

Para el diseño del circuito se hace uso de un transistor MOSFET nmos y un par de resistencias R_1 y R_2 que a priori son desconocidas. Del capítulo anterior se conoce el valor de $I_1 = 200 \text{ mA}$ en la zona de corte e $I_1 = 300 \text{ mA}$ en la zona de saturación. Sabiendo que el valor de la tensión de alimentación del circuito podemos ajustarlo al que mejor nos convenga y tomando como aproximación que la resistencia del MOSFET en saturación es 0Ω procedemos al diseño del circuito.

Cuando $V_{GS} > V_{th}$ el transistor entra en la región de saturación y el circuito puede simplificarse al siguiente:

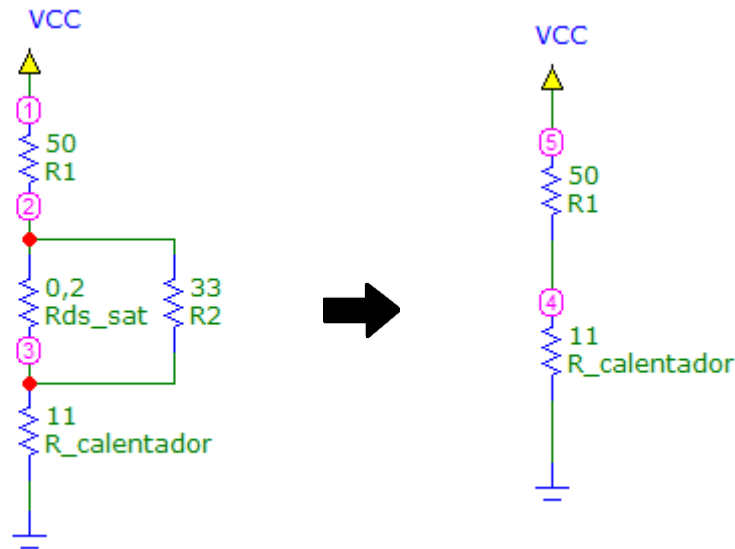


Figura 6-2. Simplificación en saturación

Al encontrarse el MOSFET en saturación la corriente circula tanto por el transistor como por la resistencia R_2 . Por tanto, queda R_2 en paralelo con $R_{DS,sat}$ y al ser mucho mayor R_2 que $R_{DS,sat}$ el circuito puede aproximarse al mostrado en la Figura 6-2.

La ecuación que lo determina es la siguiente:

$$I = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_{CALENTADOR}} \quad (6 - 1)$$

Conocido el valor de $R_{CALENTADOR} = 11 \Omega$ y ajustando el valor de $V_{CC} = 18,3 V$ (valor típico para fuente de alimentación) se obtiene un valor de $R_1 = 50 \Omega$.

Cuando $V_{GS} < V_{th}$ el transistor se encuentra en la zona de corte y el circuito se simplifica al siguiente:

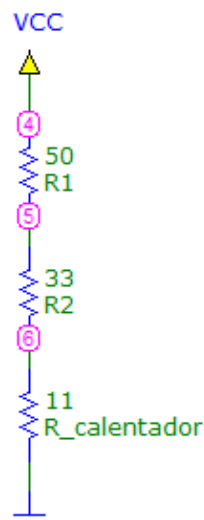


Figura 6-3. Simplificación en corte

Al encontrarse en corte el transistor MOSFET no circula corriente por el y toda la intensidad circula por R_2 .

La ecuación que determina el circuito es la siguiente:

$$I = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2 + R_{CALENTADOR}} \quad (6 - 2)$$

Únicamente se desconoce el valor de R_2 por lo que despejando se obtiene $R_2 = 30,5 \Omega$.

Podría haberse fijado el valor de la fuente de alimentación a otro valor típico, obteniéndose otros valores de resistencias igualmente válidos para nuestro circuito. Por último, ajustando los valores de las resistencias a unos valores comerciales se tiene $R_1 = 47 \Omega$ y $R_2 = 33 \Omega$.

Reajustando los valores de la corriente en la región de saturación y corte para los valores comerciales de las resistencias se obtiene:

- $I_{saturacion} = 0,315 A$
- $I_{corte} = 0,201 A$

Los porcentajes de error cometidos en las corrientes al ajustar los valores de las resistencias a unos valores comerciales se pueden calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\% error = \frac{|I_{teorica} - I_{comercial}|}{I_{teorica}} \times 100 \quad (6 - 3)$$

Aplicando la ecuación 6-3 se obtiene:

- $\% error_{saturacion} = 5 \%$
- $\% error_{corte} = 0,5 \%$

Para hacer el cálculo de las potencias disipadas en ambas regiones de funcionamiento hacemos uso de la Ley de Joule:

$$P_{disipada} = I^2 \cdot R \quad (6 - 4)$$

Obteniéndose los siguientes valores:

- $P_{disipada_corte} = 3,67 W$
- $P_{disipada_saturacion} = 5,75 W$

En resumen, se consigue que por el calentador circulen 0,2 A cuando el transistor se encuentra en la zona de corte y 0,3 A en la zona de saturación por lo que el circuito diseñado es válido.

6.2 Simulación en Micro-Cap

Para cerciorarnos de los resultados teóricos obtenidos en el capítulo anterior realizamos una simulación en Micro-Cap. Para ello conectamos una señal en la puerta del transistor que haga que el transistor oscile entre la zona de corte y saturación. Suponiendo que la tensión umbral del transistor que es la que determina que el transistor se encuentre en la región de saturación o zona de corte tiene un valor de $V_{th} \approx 0,4 V$ se introduce una señal cuadrada que oscila entre 0 y 10 V con periodo $\frac{T}{2} s$

como la que se muestra en la Figura 6-4. Encontrándose así el transistor en zona de corte para 0 V y en saturación para 10 V.

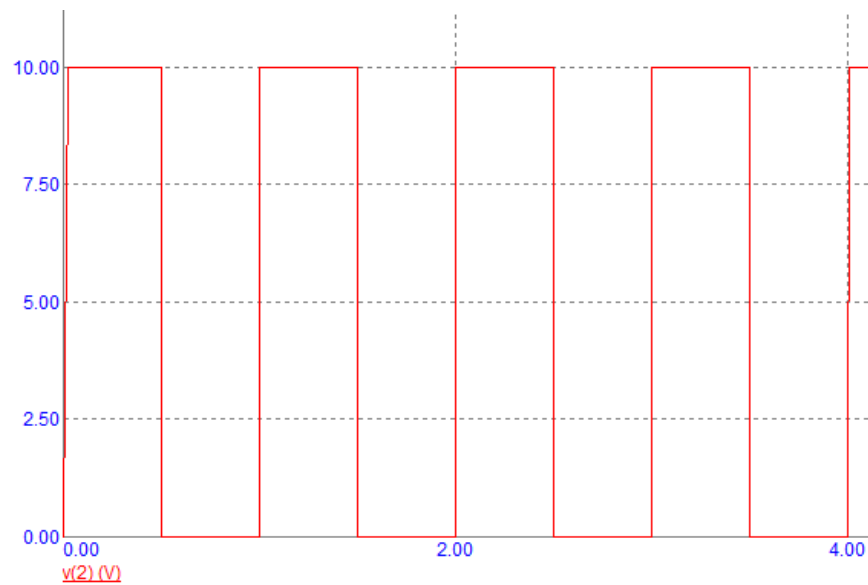


Figura 6-4. Señal cuadrada de entrada

Se realiza un análisis transitorio para observar como varía la corriente en el calentador. Esta corriente se observa en la Figura 6-5.

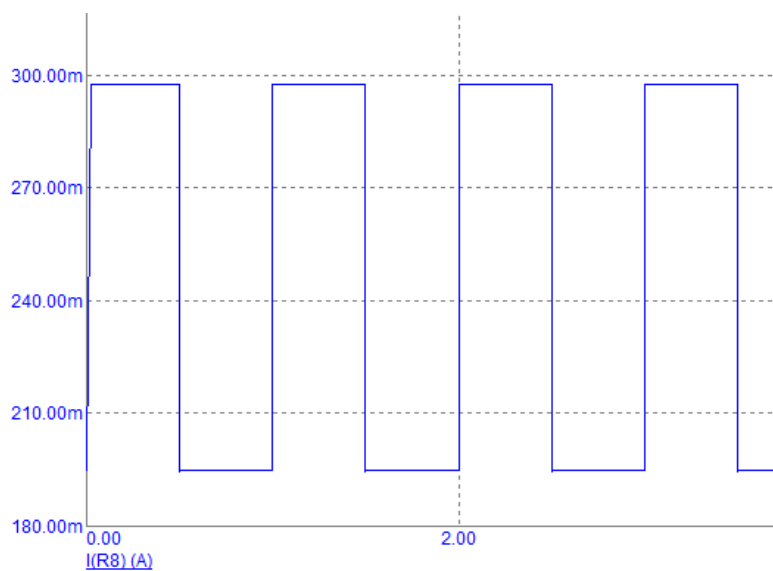


Figura 6-5. Corriente que circula por el calentador

Como se observa en la figura anterior la corriente oscila dentro del rango deseado por lo que los resultados teóricos coinciden con los de simulación.

6.3 Elección de componentes

Una vez realizado el diseño teórico del circuito y realizada la simulación para comprobar que efectivamente el circuito funciona según lo deseado procedemos a elegir los componentes que se ajusten a nuestras especificaciones.

En primer lugar, se realiza una elección de los componentes a montar en el circuito. Para ello se tienen en cuenta una serie de requisitos que deben cumplir los componentes.

En el caso de las resistencias, deben cumplir los siguientes requisitos:

- Ser capaces de soportar corrientes máximas de 0,3 A.
- Soportar altas temperaturas.
- Ser capaz de disipar 5,7 W.

Teniendo estos requisitos en cuenta y dando un margen holgado a las corrientes máximas a soportar y potencias a disipar para no hacer que el componente trabaje cerca de su límite se elige una resistencia de 33 Ω y otra de 47 Ω de las siguientes características:

- Material: cerámica.
- Potencia nominal: 10 W.
- Tolerancia: 5%.



Figura 6-6. Resistencias de tipo tiza

El transistor elegido para el montaje del circuito es el transistor MOSFET de potencia IRFB4227PbF por sus buenas características. Algunas de ellas son:

- $V_{DSmax} = 200 V$.
- $I_{RP} \max (Tc 100 ^\circ C) = 130 A$.
- $V_{GSmax} = 30 V$.



Figura 6-7. Transistor MOSFET IRFB4227

Es necesario el acondicionado de la señal de entrada a la señal que recibe la puerta del MOSFET de potencia, por tanto, es necesario hacer uso de un driver que realice esta conversión. El driver elegido es el driver MOSFET TC4427 por su alta velocidad de conversión y características. Algunas de ellas son las siguientes:

- Velocidad de conversión = 30 ns.
- Corriente de entrada = 1,5 A.
- Rango de tensión de entrada = 4,5 V a 18 V.

Al utilizar este driver de alta velocidad los retrasos introducidos son despreciables por lo que no afecta al funcionamiento del circuito.

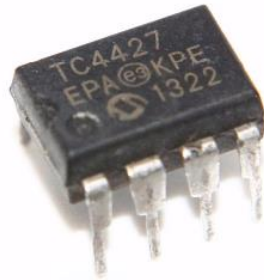


Figura 6-8. Driver MOSFET TC4427

6.4 Montaje en placa de pruebas

Una vez elegidos los componentes procedemos a montar el circuito en una placa de pruebas para comprobar si el circuito funciona como se desea.

Para el montaje del circuito hay que tener en cuenta el *pinout* del driver y transistor que se observa en la Figura 6-9. Las patas 1, 4, 5 y 8 se dejan al aire ya que no es necesario hacer uso de ellas. En la pata 2 (IN A) se conecta la señal cuadrada de entrada, la pata 3 se conecta a tierra, la pata 7 (OUT A) correspondiente a la salida del driver se conecta a la puerta del transistor y la pata 6 correspondiente a la alimentación del driver se conecta a una tensión de 15 V.

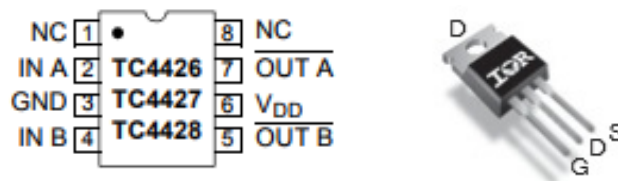


Figura 6-9. *Pinout* del driver y transistor

A pesar de que las resistencias están diseñadas para soportar la potencia disipada, en la primera prueba experimental se comprobó un incremento de temperatura elevado en la resistencia de 47 Ω . Por este motivo, además de los componentes mencionados en el capítulo anterior, se le coloca un disipador a dicha resistencia y se conecta un ventilador apuntando a las resistencias para reducir el tiempo de enfriamiento.

El hecho de que haya sido conveniente colocar un disipador a la resistencia de 47 Ω se debe a que una vez está el circuito en funcionamiento siempre está circulando corriente por ella, aumentando así

su temperatura hasta alcanzar un régimen permanente. En cambio, por la resistencia de $33\ \Omega$ únicamente circulará corriente cuando el transistor se encuentre en la zona de corte que dependerá del *duty cycle* que se le aplique a la señal de entrada. La señal de entrada que se conecta a la pata 2 del driver tiene $3,3\ \text{Vpp}$ de amplitud y $1,650\ \text{V}$ de *offset* para que la amplitud varíe entre 0 y $1,650\ \text{V}$ y el transistor pase de zona de corte a saturación periódicamente. Por otro lado, el *duty cycle* será del 50% y una frecuencia de $300\ \text{mHz}$.



Figura 6-10. Señal de entrada

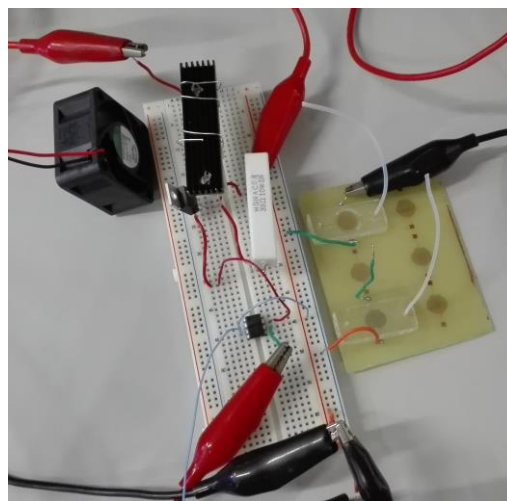


Figura 6-11. Montaje en placa de prueba

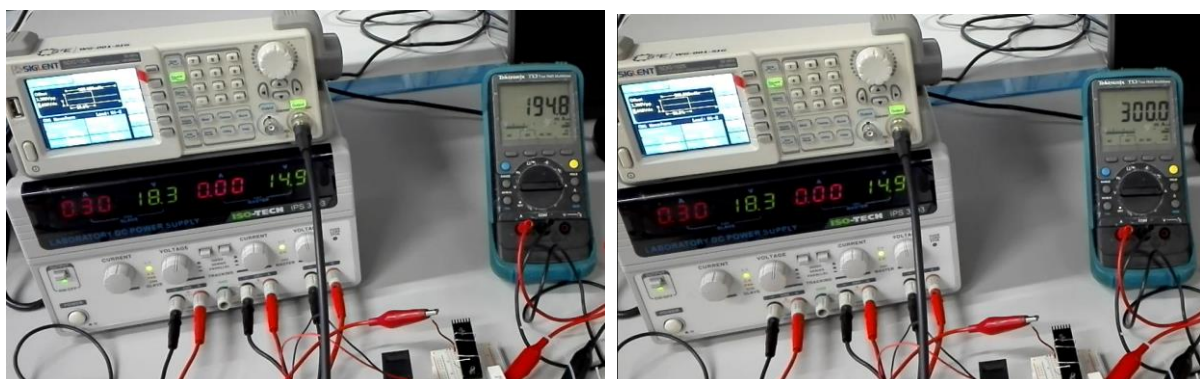


Figura 6-12. Prueba de funcionamiento

Como se observa en la Figura 6-12 la intensidad oscila entre los 195 y 300 mA por lo que su funcionamiento es el deseado.

6.5 Fabricación del circuito electrónico en PCB

En este punto se explica el proceso llevado a cabo para la fabricación del circuito propuesto en PCB. En primer lugar, se diseña el esquemático, posteriormente el rutado del circuito impreso y por último la fabricación del circuito en PCB y el montaje de los componentes.

6.5.1 Esquemático

Para la realización del esquemático se hace uso del software CadSoft EAGLE PCB, el cual lleva incorporado un autoenrutador. En lo que a diseño de PCBs se refiere este programa es uno de los más populares debido a su facilidad de uso y a la buena calidad de los circuitos diseñados.

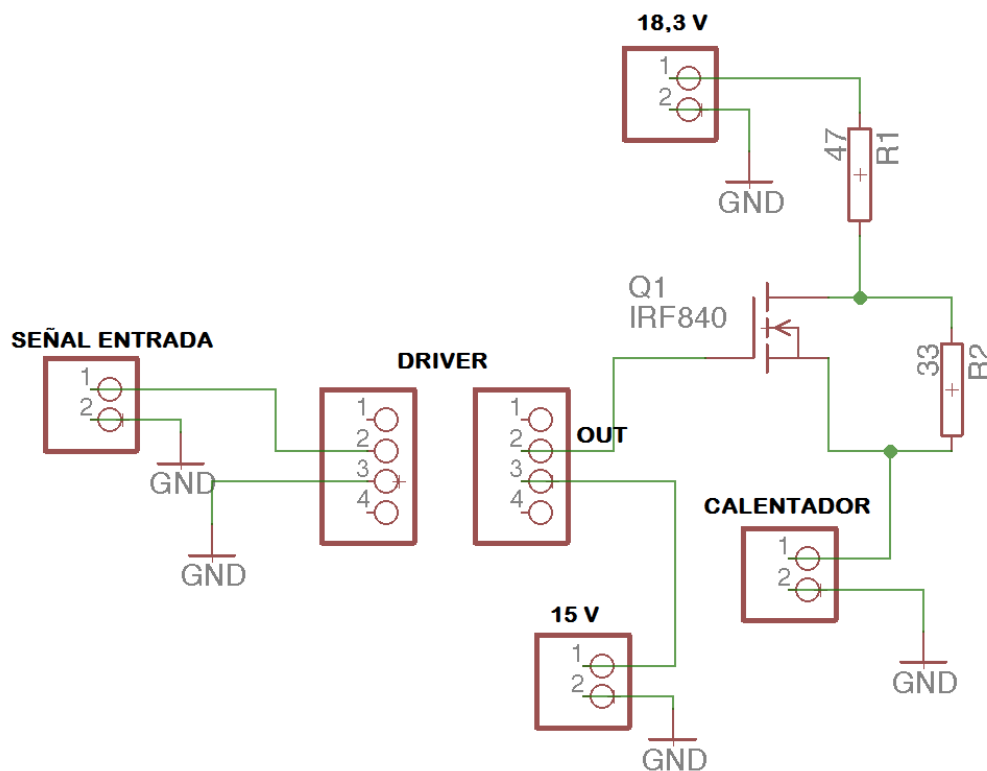


Figura 6-13. Esquemático del circuito en Eagle

En la figura anterior podemos observar el esquemático del circuito electrónico diseñado en Eagle. Dado que el encapsulado del driver no se encuentra en las librerías del software, se ha realizado su esquemático incluyendo dos *jumpers* que mantienen su forma y separación entre patas. Por otro lado, la conexión del calentador a la placa se realiza mediante un *jumper* conectado entre la resistencia de 33 Ω y tierra.

Suponiendo que tenemos nuestro diagrama esquemático terminado, antes de proceder a realizar el trazo de pistas o ruteo se recomienda revisar los errores de esquemático con el ERC (*Electrical Rule Check*). Esta herramienta busca los errores potenciales en el diseño que pudiese tener el circuito

automáticamente y los agrupa como errores o advertencias. Al seleccionar con doble clic en el error o advertencia nos posiciona directamente sobre el mismo facilitando la tarea de corrección. Cuando no se encuentren errores o sean irrelevantes pasamos a la fase de rutado de las pistas.

6.5.2 Layout

Una vez se han conectado todos los componentes en el esquemático y se ha realizado el ERC satisfactoriamente comenzamos con el rutado de las pistas.

En primer lugar, se organizan los componentes de manera que las pistas que se rutén sean lo más cortas posibles y el PCB quede lo más compacto que se pueda. En este PCB solo es necesaria la capa superior “Top” para la colocación de los componentes y el rutado de las pistas. Por último, antes de comenzar con el rutado, debemos verificar que nuestro diseño cumple con las reglas de diseño (DRC) que deseemos. Se pueden ajustar parámetros como el ancho de las pistas, la distancia entre componentes, el tamaño de las vías y pads entre otros. Algunas de las reglas que se han aplicado para el diseño son las siguientes:

- Clearance: la mínima separación entre pistas, pad y vías será de 15 mil.
- La anchura mínima de las pistas será de 60 mil ya que por las pistas circularán corrientes de 0,3 A.

Además, se realizará un plano (*polygon*) que cubra toda la cara de las pistas. La realización de este paso acelera el tiempo de fabricación del PCB ya que el tiempo de atacado de la placa disminuye y se reduce la resistencia entre todos los puntos que están conectados a la tierra del circuito.

El rutado de las pistas se realiza con la herramienta *autorouter* que realiza el rutado de las pistas de forma automática. Esta herramienta genera varios diseños de trazado de las pistas, en nuestro caso elegimos aquel que genera las pistas más cortas.

Se utiliza la herramienta de rutado automático de la que dispone Eagle. Esta herramienta da la posibilidad de elegir entre varios diseños, y por tanto se escoge aquel que genera el menor número de vías y el rutado de pistas menos complejos.

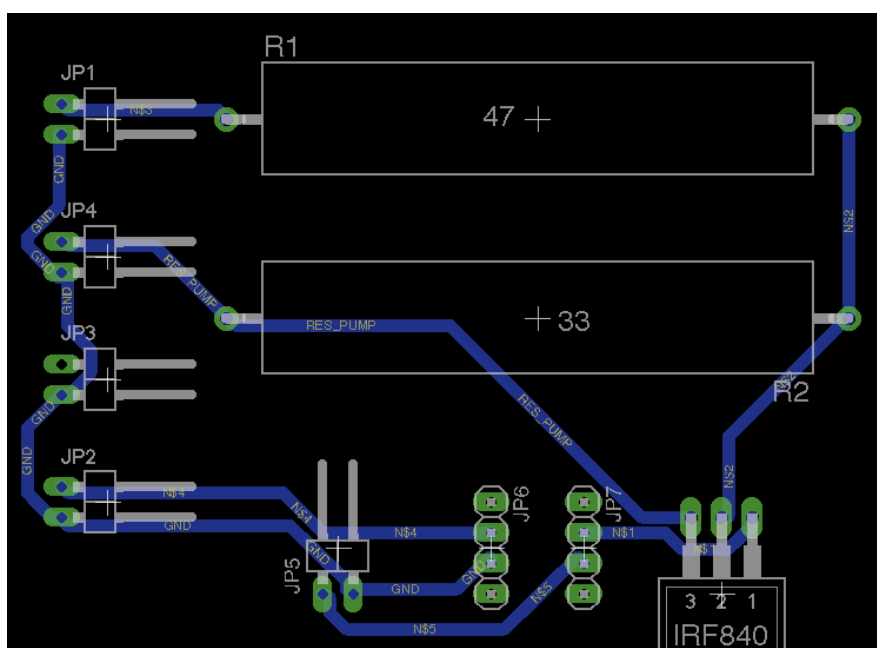


Figura 6-14. Layout del circuito

6.5.3 Construcción del PCB

Una vez completado el proceso de rutado de las pistas se generan e imprimen las máscaras del circuito sobre papel vegetal para la fabricación del PCB.

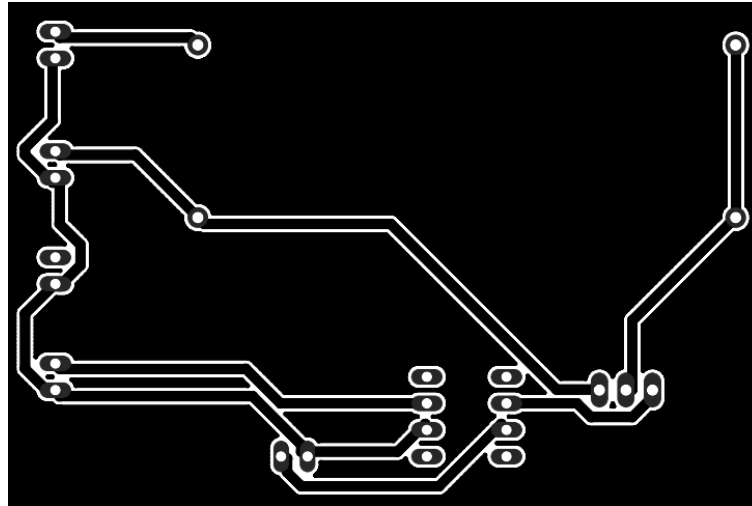


Figura 6-15. Máscara del circuito electrónico

El material necesario para la fabricación del circuito impreso es el siguiente:

- Placa de PCB positiva a una cara con un espesor de cobre de $70\ \mu\text{m}$ para que las pistas de cobre sean capaces de disipar gran cantidad de calor, y por tanto disminuir la temperatura de la placa.
- Insoladora de rayos ultravioleta.
- Líquido revelador.
- Peróxido de hidrógeno.
- Ácido clorhídrico.
- Acetona.

Una vez impresa la máscara, se recorta la silueta del circuito dejando un margen de aproximadamente un centímetro. Posteriormente se usa la guillotina para recortar la placa con un tamaño ligeramente superior al del circuito recortado del papel vegetal.

A continuación, vertemos el líquido revelador sobre un recipiente y preparamos la disolución del líquido atacante. Para la preparación del líquido atacante seguimos la siguiente proporción:

- 25 ml de ácido clorhídrico.
- 25 ml de peróxido de hidrógeno.
- 50 ml de agua.

El siguiente paso se trata del revelado del PCB. Para ello hacemos uso de la insoladora de rayos ultravioleta disponible en los laboratorios del departamento. Estos rayos eliminan la resina que cubre la cara fotosensible de la placa positiva, en aquellas zonas expuestas directamente a la luz.



Figura 6-16. Insoladora rayos UV

En primer lugar, se despegla la cubierta adhesiva de la placa para dejar al descubierto la cara fotosensible. A continuación, se coloca la placa descubierta con la cara fotosensible hacia arriba, y sobre ella colocamos el papel vegetal con el circuito impreso lo más centrado posible. Posteriormente se baja la cubierta de plástico sobre la placa y se acciona la succionadora. Con este sistema de vacío se acopla perfectamente el diseño impreso del papel vegetal sobre la placa, optimizando su revelado. A continuación, se eliminan las burbujas de aire que hayan podido quedar entre la insoladora y la cubierta de plástico. Posteriormente, se cierra la la cubierta metálica de la insoladora y se marcan 2 minutos y medio de exposición. Cuando hayan transcurrido los 2 minutos y medio apagamos la succionadora y esperamos 30 segundos aproximadamente para que cese el vacío entre la cubierta de plástico y el soporte de cristal.

El siguiente paso es sumergir la placa durante 2 minutos aproximadamente en el recipiente del líquido revelador preparado anteriormente. Este líquido actuará de capa protectora sobre las zonas de la placa que no han sido insoladas, evitando que el ácido las ataque y elimine el cobre que hay en ellas. Una vez transcurridos los 2 minutos, se saca la placa del recipiente y se enjuaga con agua. Posteriormente sumergimos la placa en el recipiente que contiene el líquido atacante. El ácido atacará y disolverá en unos minutos el cobre que no ha sido protegido por el líquido revelador. Este proceso puede acelerarse agitando la placa dentro del recipiente, observando como el líquido burbujea, efecto del atacado del ácido sobre el cobre. Por último, se enjuaga la placa y se le aplica acetona ya que tras el revelado del PCB aún permanece una capa de resina que protege el cobre de la oxidación y que nos impide soldar los componentes sobre las pistas de cobre.

Los últimos pasos son el taladrado y el soldado de los componentes en la placa. Las perforaciones han de realizarse siempre en trayectoria perpendicular a la placa, atravesando con la punta de la broca el PCB sin brusquedad. No realizar las perforaciones en trayectoria perpendicular provocará que el diámetro de la perforación no sea el deseado e incluso la rotura de la broca. En cuanto al proceso de soldado se refiere, se emplea un metal de aportación con un bajo punto de fusión que en nuestro caso se trata de estaño. La soldadura persigue no sólo la conexión mecánica, sino también eléctrica entre el terminal del componente con el pad de la placa PCB.

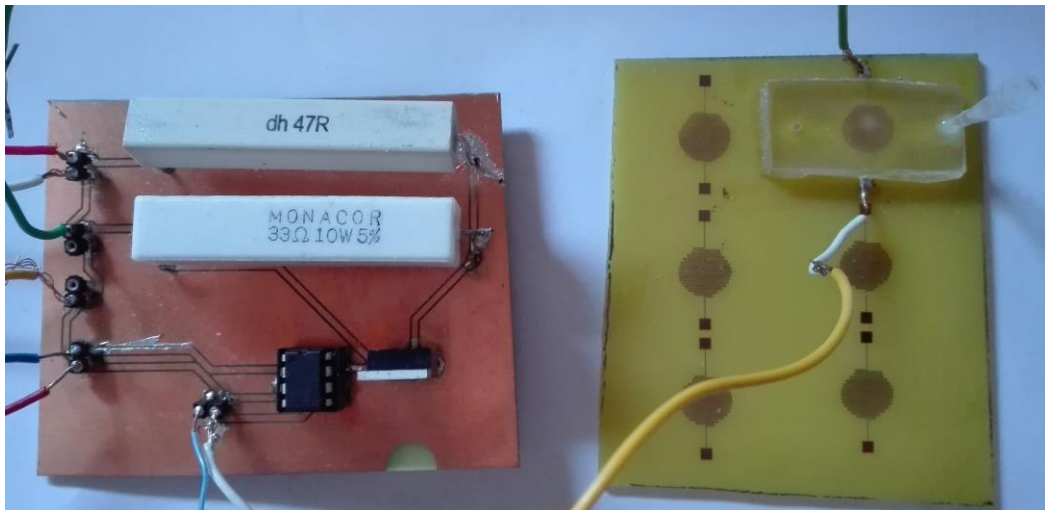


Figura 6-17. Circuito electrónico conectado a la microbomba

Cuando se termina con el proceso de soldadura es recomendable realizar algunas comprobaciones previas a la puesta en funcionamiento del circuito ya que pueden detectarse los siguientes fallos:

- Una soldadura incorrecta puede provocar un fallo por circuito abierto.
- Un exceso de estaño puede provocar fallo por cortocircuito.

Para ello hacemos uso del multímetro en modo comprobación de continuidad y comprobamos la correcta conexión de unos componentes con otros y la existencia de aislamiento con pistas adyacentes.

Por último, comentar que el hecho de que las pistas se encuentren en la misma cara donde van soldados los componentes se debe a que de manera simultánea se pueda evacuar el máximo calor posible de las pistas de cobre y de los componentes. De forma que el ventilador enfríe solo por la cara donde se encuentran los componentes.

7 MONTAJE EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

En este apartado se realiza una descripción del montaje experimental, las pruebas realizadas y los resultados obtenidos. En primer lugar, se enumeran los equipos y material de laboratorio de los que se ha hecho uso. Posteriormente se detallan las conexiones y el procedimiento seguido para la realización de las diferentes pruebas. Por último, se muestran y analizan los resultados experimentales que se han obtenido.

7.1 Montaje experimental y procedimiento

Para la realización del montaje y las pruebas se ha hecho uso de los siguientes equipos y material de laboratorio:

- Fuente de alimentación DC.
- Generador de señales.
- Cables tipo banana-cocodrilo.
- Cable BNC a dos pinzas cocodrilo.
- Microscopio con cámara de vídeo.
- Pipeta automática de volumen variable.
- Isopropanol.
- Pie de rey digital
- Cono de jeringa.



Figura 7-1. Pie de rey digital

Se hace uso de este instrumento para medir con gran precisión la cantidad de isopropanol que ha desplazado la microbomba.



Figura 7-2. Pipeta automática

Este instrumento de laboratorio se emplea para absorber y transferir pequeños volúmenes de isopropanol del orden de los microlitros.

Enunciados los equipos y el material de laboratorio necesario para llevar a cabo el montaje y las pruebas se detalla el procedimiento seguido para la puesta a punto del circuito electrónico y microbomba.

En primer lugar, se debe generar la burbuja en el interior de la cámara. Para ello se sueldan dos cables a los pads del calentador y se fija la fuente de alimentación a la tensión máxima limitando así la corriente a aplicar en el calentador. Posteriormente se llena la microbomba de isopropanol con la ayuda de una jeringa. A continuación, se conecta un cable banana-cocodrilo a uno de los cables soldados a un pad del calentador y se aplica una corriente de 0,25 A, el otro cable se conecta a tierra. Transcurridos 15 segundos aproximadamente el calentador habrá alcanzado la temperatura óptima para provocar la generación de la burbuja. Una vez formada la burbuja en el interior de la cámara, se deja de aplicar corriente al calentador.

Una vez se tiene la burbuja formada procedemos al montaje del sistema. Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Se conecta la placa PCB que contiene la microbomba con el calentador al circuito electrónico. Para ello se introducen los cables soldados anteriormente en los pines apropiados de la placa del circuito.
2. Se fijan 3 tensiones en la fuente de alimentación. 18, 3 V que será la alimentación de la placa, 15 V correspondientes a la alimentación del driver y 5 V que corresponde a la alimentación del ventilador. La conexión de estas tensiones se realiza con cables banana-cocodrilo.
3. Se genera la señal deseada con el generador de señales y se conecta a la entrada del driver con un cable BNC a dos pinzas cocodrilo.
4. Se coloca la placa PCB de la microbomba en el microscopio para poder grabar el sistema en movimiento y visualizar con detalle el movimiento de isopropanol.
5. Se coloca el ventilador apuntando a la placa para refrigerar el sistema.
6. Se habilitan los pulsadores *output* de la fuente de alimentación y del generador de señales.

Cada vez que se quiera realizar una prueba con una señal diferente se debe generar una nueva burbuja. Esto supone vaciar la microbomba de isopropanol y posteriormente volver a llenarla. Se hace de esta manera para realizar la prueba de cada señal desde las mismas condiciones de partida, evitando así que la vibración de la burbuja de una prueba anterior altere los resultados de la siguiente prueba.

Es conveniente dejar 3 minutos aproximadamente entre la realización de cada prueba para que el sistema tenga tiempo de refrigerarse.

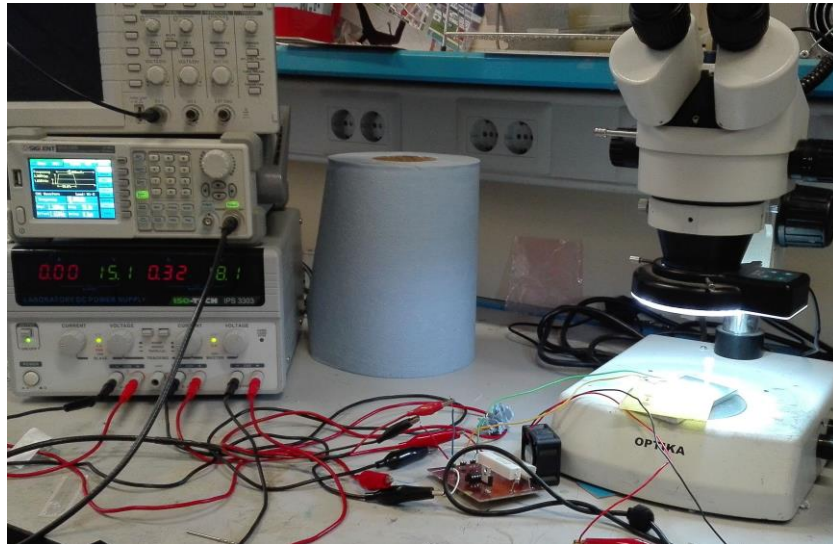


Figura 7-3. Montaje experimental

7.2 Resultados experimentales

En este apartado se analizan los parámetros referentes a la bomba. Para ello se realizan gran cantidad de pruebas en las que la señal de entrada varía en frecuencia y *duty cycle*. Además, se busca encontrar el punto donde se obtienen los mejores resultados de bombeo, el caudal conseguido y la forma de calcularlo. En cada una de las pruebas se graba el movimiento del isopropanol y la vibración de la burbuja para posteriormente analizar en detalle su comportamiento.

Comenzamos comentado como se calculará el caudal en cada una de las pruebas a realizar. En la Figura 7-4 se puede observar la vista transversal del dispositivo microfluídico, en el que se ha introducido perpendicularmente en el canal de entrada de la microbomba el cono de una jeringa y se ha sellado con pegamento para evitar la fuga de isopropanol.

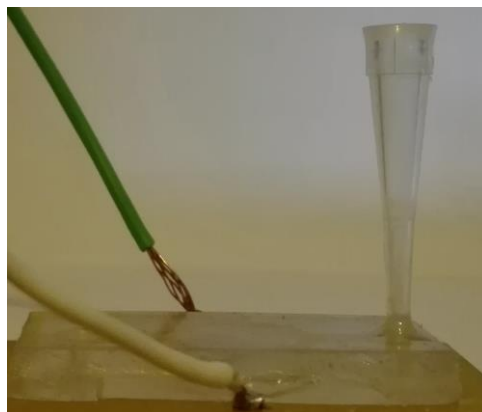


Figura 7-4. Vista transversal del dispositivo microfluídico

En primer lugar, se calculan los volúmenes de los conos mostrados en la Figura 7-5.

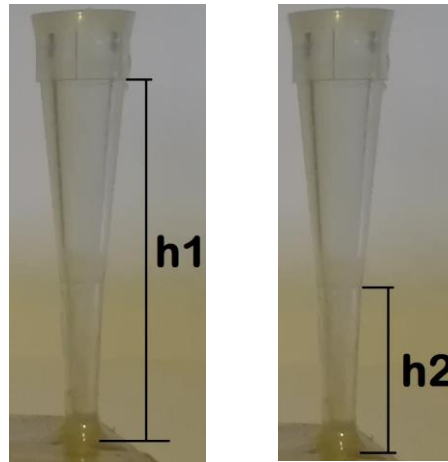


Figura 7-5. Altura de conos

El volumen de un cono puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$V = \frac{1}{3}\pi r^2 h \quad (7 - 1)$$

Donde r es el radio de de la base y h la altura.

Con la ayuda del pie de rey mostrado en la Figura 7-1 se miden las alturas y los diámetros de las bases, obteniéndose los siguientes valores:

- $h_1 = 27 \text{ mm}, r_1 = 1,35 \text{ mm}.$
- $h_2 = 16 \text{ mm}, r_2 = 0,7 \text{ mm}.$

Aplicando la ecuación 7-1 se obtienen los siguientes volúmenes:

- $V_1 = 51,5 \mu\text{l}$
- $V_2 = 8,21 \mu\text{l}$

En la realización de cada prueba se llenará el cono de la jeringa de isopropanol hasta la altura h_1 y se medirá el tiempo que tarda el dispositivo en bombear el fluido hasta alcanzar la altura h_2 . Se hace de este modo ya que al introducir el cono de la jeringa en el canal de entrada del dispositivo no sabemos exactamente en qué tiempo se ha vaciado por completo el cono ya que la vista transversal del dispositivo no es transparente. Además, de esta forma se reduce el tiempo necesario para la realización de cada prueba ya que la microbomba tiene que desplazar menor cantidad de fluido.

Por tanto, el volumen que se tendrá en cuenta para el cálculo de los caudales es el mostrado en la Figura 7-6.

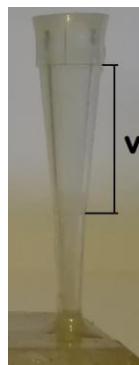


Figura 7-6. Volumen cono

El volumen mostrado en la figura anterior se calcula como:

$$V = V_1 - V_2 \quad (7 - 2)$$

Obteniéndose un volumen de 43,28 μl .

El caudal de cada prueba puede calcularse fácilmente aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{Caudal} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Tiempo}} \quad (7 - 3)$$

Por último, en lo que al cálculo del caudal se refiere, se debe tener en cuenta el efecto de la gravedad sobre el isopropanol contenido en el cono de jeringa. Debemos asegurarnos de que el cono se vacía por el efecto del bombeo y no por la fuerza de la gravedad, que debería ser despreciable debido al dominio de la tensión superficial. Para comprobar que el efecto de la gravedad es despreciable frente al bombeo de la microbomba en el cálculo del caudal, llenamos el cono de jeringa y medimos el tiempo que tarda el isopropanol en pasar del nivel h1 al h2 sólo por la fuerza de la gravedad. Este tiempo resulta ser de 1 hora y 15 minutos por lo que posteriormente se comprobará que puede considerarse despreciable dicho efecto frente al bombeo.

Una vez conocemos la forma de calcular los caudales procedemos a realizar diferentes pruebas para estudiar como vibra la burbuja en función de la frecuencia y *duty cycle*, y encontrar el punto donde se consiguen los mejores resultados de bombeo en cuanto a caudal se refiere.

En la realización de cada una de las pruebas se introduce una señal cuadrada de 3,3 Vpp y un offset de 1,650 V. Para cada prueba se irá variando la frecuencia y el *duty cycle*. La siguiente tabla recoge las diferentes señales con las que se ha experimentado:

FRECUENCIA	DUTY CYCLE
50 mHz	50 %
50 mHz	40 %
100 mHz	50 %
150 mHz	50 %
200 mHz	50 %
300 mHz	50 %
300 mHz	30 %
500 mHz	40 %
500 mHz	50 %
750 mHz	50 %
1 Hz	50 %
2,5 Hz	50 %
5 Hz	50 %

Tabla 7-1. Señales generadas

Tras la realización de las pruebas con las señales que se recogen en la tabla anterior se observa que a medida que se aumenta la frecuencia, la vibración de la burbuja es más rápida y que al aumentar el *duty cycle*, que supone elevar el tiempo de circulación de la corriente de 0,3 A por el calentador, la burbuja se expande más. Sin embargo, a frecuencias elevadas la vibración de la burbuja es tan rápida que la burbuja no tiene tiempo de expandirse y por tanto no existe bombeo. Por otro lado, *duty cycles* superiores al 50 % suponen que la burbuja esté más tiempo expandiéndose que colapsándose, provocando que transcurrido un tiempo la burbuja ocupe toda la cámara y por tanto no se produzca la vibración que genera el movimiento del fluido.

En la realización de muchas de las pruebas la burbuja se coloca sobre la tobera de entrada o salida. Cuando la burbuja se coloca sobre la tobera de entrada, al producirse el bombeo, el canal de entrada se llena de aire provocando que no se bombee isopropanol sino aire, invalidando de este modo la prueba. Del mismo modo ocurre cuando la burbuja se posiciona sobre la tobera de salida.

La prueba con la que se han conseguido mejores resultados de la vibración de la burbuja y, por tanto, de bombeo es la siguiente:

Señal de 50 mHz y 50 % de duty cycle

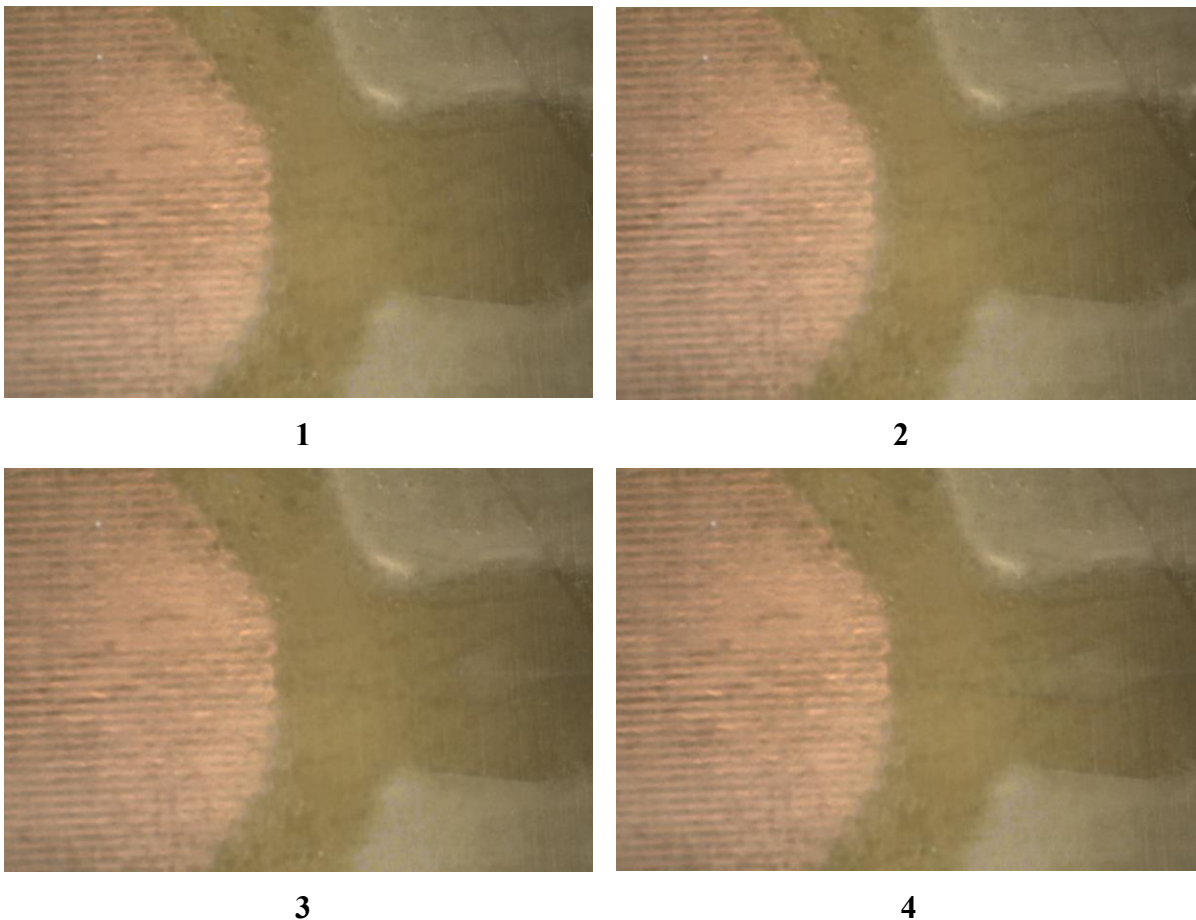


Figura 7-7. Bombeo con una señal de 50 mHz y 50 % de *duty cycle*

En la Figura 7-7 se observa la vibración de la burbuja y el movimiento del isopropanol a la frecuencia y *duty cycle* indicados anteriormente. En el momento de la instantánea 1 la corriente que circula por el calentador son 0,2 A y se puede observar como el canal de entrada se encuentra completamente lleno de isopropanol y la burbuja se encuentra en colapso. En la instantánea 2 la

corriente que circula por el calentador son 0,3 A, esto provoca que la burbuja se expanda. En la instantánea 3 se observa como al pasar de una corriente de 0,3 A a 0,2 A la burbuja entra en estado de colapso, provocando un impulso del fluido del canal de entrada hacia el canal de salida. En la última instantánea se aprecia como la burbuja ha llegado a su estado de colapso más bajo y el canal de entrada se encuentra vacío de isopropanol debido al bombeo producido anteriormente.

Para estos valores de la señal de entrada, el tiempo que ha tardado la microbomba en impulsar un fluido igual al contenido en el volumen V de la Figura 7-6 (en pasar del nivel h_1 al h_2 del cono de la jeringa) han sido 10,41 minutos. Por tanto, el caudal que se consigue a una frecuencia de 50 mHz y un *duty cycle* del 50 % es de 4,05 $\mu\text{l}/\text{min}$ bajo un consumo de potencia medio de 4,7 W.

8 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

El propósito principal del proyecto fue el diseño y la fabricación de un actuador térmico de burbuja para el movimiento de muestras líquidas. A lo largo del desarrollo del trabajo se muestra como se ha diseñado y fabricado el sistema, logrando que el actuador realice su función satisfactoriamente.

En este apartado se recogen las conclusiones obtenidas tras el desarrollo del proyecto y se realiza una descripción sobre las líneas futuras de investigación.

8.1 Conclusiones

Como objetivos específicos, propusimos que el sistema cumpliera una serie de especificaciones como la utilización de tecnologías de producción masiva, un proceso de fabricación rápido, simple y de bajo coste, la utilización de materiales de bajo coste, una microbomba que no dispusiera de válvulas para el control de las muestras líquidas y la consecución de un caudal del orden de los microlitros. Como se ha podido comprobar en el transcurso de la memoria, todos estos objetivos se han logrado por las siguientes razones:

- Empleando la técnica de estampado de precisión en caliente hacemos uso de una tecnología de producción masiva.
- Se emplea la técnica típica de fabricación de PCB y la técnica de *hot embossing*, cuyas características principales son un proceso de fabricación simple, rápido y de bajo coste.
- Se ha hecho uso de materiales baratos, como lo son el FR4 y el poliestireno.
- Se ha conseguido un caudal de 4,05 $\mu\text{l}/\text{min}$ por lo que queda cumplido el objetivo.
- No son necesarias microválvulas para el controlar el caudal y la dirección del flujo de fluido.

Las microválvulas generalmente incrementan la complejidad del proceso de fabricación, la posibilidad de obstrucción de partículas y la contaminación en las vías microfluídicas. Estos defectos hacen que el diseño de la microbomba sin válvula se convierta en un camino alternativo atractivo.

8.2 Líneas futuras

En este punto se recogen las futuras mejoras que se le podrían añadir al proyecto con el fin de aumentar sus prestaciones:

- Cambio en la geometría del calentador para fomentar la aparición de la burbuja lo más centrada posible en el interior de la cámara.
- Mejorar los métodos de llenado y generación de la burbuja.
- Cambiar la geometría de la cámara a una sección cónica para mantener la burbuja lo más centrada posible, evitando de este modo que se desplace hacia el canal de entrada o salida colapsándolos.
- Estudiar la posibilidad de usar un par Darlington para el control de la corriente.

REFERENCIAS

- [1] M. R. Olmos, *Microprocesos Aplicados*, México, 2009.
- [2] P. D. R. May y A. L. Herrera, «Microbombas para aplicaciones biomédicas,» 2016.
- [3] E. Stemme y G. Stemme, «A valveless diffuser/nozzle based fluid pump.,» n° 39, pp. 159-167, 1993.
- [4] A. Nisar, N. Afzulpurkar, B. Mahaisavariya y A. Tuantranont, «MEMS-based micropumps in drug delivery and biomedical applications,» *Sensors and Actuators*, 2008.
- [5] J. Judy, T. Tamagawa y S. m. m. D.L. Polla, «Surface micromachined micropump,» pp. 182-186, 1991.
- [6] R. Zengerle, A. Richter y H. Sandmaier, «A Micro Membrane Pump with Electrostatic Actuation.,» 1992.
- [7] H. V. Lintel, F. v. D. Pol y S. Bouwstra, «A piezoelectric micropump based on micromachining of silicon,» pp. 153-167, 1988.
- [8] F. V. D. Pol, H. V. Lintel, M. Elwenspoek y J. Fluitman, «A thermopneumatic micropump based on microengineering techniques,» pp. 198-202, 1990.
- [9] M. Zdelblich y J. Angell, «A microminiature electric to fluidic valve,» de *Transducer'87*, Tokyo, 1987.
- [10] S. Bohm, W. Olthuis y P. Bergveld, «A plastic micropump constructed with conventional techniques and materials.,» pp. 223-228, 1999.
- [11] J. Jang y S. Lee, «Theoretical and experimental study of MHD (magnetohydrodynamic),» pp. 84-89, 2000.
- [12] D. J. Laser y J. G. Santiago, «INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING,» Stanford, 2004.
- [13] B. S. F, T. L. S, M. M y L. J. H, «Microfabricated electrohydrodynamic pumps,» 1990.
- [14] Probstein, «Physicochemical Hydrodynamics,» New York, 1994.
- [15] J.-H. Tsai y L. Lin, «A Thermal-Bubble-Actuated Micronozzle-Diffuser Pump,» de *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, 2002.
- [16] M. J. Martín, *Procesos de grabado y litografía*.
- [17] A. C. Porta, *Diseño y fabricación de dispositivos híbridos planares*.
- [18] «micromanufacturing,» [En línea]. Available: www.micromanufacturing.net. [Último acceso: 2017].
- [19] «Tecnología MEMS» [En línea]. Available: bibling.us.es/proyectos/abreproy/4966/MEMS. 2017.

