

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías de
Telecomunicación

Caracterización del plasma de oxígeno para
microsistemas

Autor: Juan Antonio Carrasco Ruiz

Tutor: Antonio Luque Estepa

**Dep. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación

Caracterización del plasma de oxígeno para microsistemas

Autor:

Juan Antonio Carrasco Ruiz

Tutor:

Antonio Luque Estepa

Profesor titular

Dep. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2016

Proyecto Fin de Carrera: Caracterización del plasma de oxígeno para microsistemas

Autor: Juan Antonio Carrasco Ruiz

Tutor: Antonio Luque Estepa

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2013

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis amigos

A todos los que creyeron en mí

Agradecimientos

Este trabajo de fin de grado ha ayudado mucho a comprender la naturaleza del polidimetilsiloxano (PDMS) y a determinar una forma audaz y limpia de conseguir pegarlo de forma eficaz. Pero esto no hubiese sido posible de no haber contado con el apoyo y la ayuda de muchas personas con las que he recorrido un largo camino hasta llegar donde estoy.

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor Antonio Luque Estepa el haberme la oportunidad de realizar este Trabajo de Fin de Grado y el haberme guiado y supervisado para su correcto desarrollo. También quiero agradecer al resto de profesores del departamento y alumnos de doctorado que me han servido de guía en esas horas de trabajo en el laboratorio, en especial a Blas, quien me ha ayudado a desenvolverse correctamente con la manipulación y fabricación del PDMS además de a realizar las pruebas.

También quiero dar las gracias a mi familia, que me ha apoyado desde la distancia y nunca han dejado de darme ánimos para terminar el Grado, y en especial a mi madre, a quien espero hacer sentir orgullosa cuando consiga graduarme. También a los muchos amigos que he hecho en la universidad, quienes han sido mi segunda familia durante todos estos años.

Por último, quiero agradecer a aquellas personas que ya no están conmigo, y que lamentablemente no podrán verme graduado, pero que siguen en mis recuerdos y que jamás olvidaré. Muchas gracias.

Juan Antonio Carrasco Ruiz

Sevilla, 2016

Resumen

En el mundo actual la electrónica se ha convertido en un pilar para una gran cantidad de disciplinas del conocimiento. La creación de sistemas electrónicos se ha ido mejorando linealmente en términos de consumo y tamaño.

El uso de los microsistemas en áreas como la bioingeniería ofrece un sin fin de posibles avances y líneas de conocimiento. En este caso, estudiaremos el material conocido como polidimetilsiloxano (PDMS) y estudiaremos como tratarlo como material para la creación de sistemas microelectromecánicos (MEMS). Al ser un material bastante rebelde en cuanto a su manipulación, cuesta pegarlo y usarlo a menos que se usen técnicas especializadas. Una técnica eficaz es el pegado del PDMS mediante el uso de plasma de oxígeno.

El objetivo de este trabajo es el estudio y caracterización de esta técnica de pegado y su optimización de cara a la fabricación de sistemas y aplicaciones que deseen utilizar el PDMS como materia prima. Las primeras investigaciones buscaron encontrar un método eficaz y fiable para obtener las medidas concierentes al pegado mediante el uso de una fuente de aire comprimido de presión variable. El resto de pruebas permitieron estudiar concienzadamente el comportamiento de la unión de las capas pegadas en función de las variables que intervienen en el proceso, descubriendo así que estas variables son, ordenadas de menor a mayor influencia, la presión del gas que da lugar al plasma, la masa de las muestras a unir y el tiempo de exposición de las muestras ante el plasma.

Una vez estudiados todos los parámetros se realizan pruebas para corroborar las teorías propuestas en relación a ellos, obteniendo en dos pruebas un pegado eficiente con una fuerza cercana a la que se predijo.

Abstract

Nowadays electronics have merged as a mainstay for a big amount of scientific disciplines. The creation of electronic systems has grown lineally in terms of compsumtion and size.

The employment of microsystems in areas such as bioengineering provides an endless list of possible achievements and investigation lines. In this case, a material known as polydimethylsiloxane (PDMS) will be studied and it will be studied as material dedicated for creating microelectromechanical systems (MEMS). Being a very tough material tu work with, it is pretty hard to stick it and use it unless specialized techniques are used. An efficient technique is sticking PDMS by using oxygen plasma.

The goal of this project is the study and characterisation of this technique of stickment and its optimisation to employ it at systems fabrication and applications which wish to use PDMS as prime material. The first improvements were made in order to find an efficient and reliable method to obtaning measures related to the binding by using a compressed air supply with variable pressure. The rest of the tests let to study the behavior of the bonding of the different layers according to the variables which participate in the process, showing that these variables are, sorted from lower to higher influence, the plasma gas's pressure, the mass of the samples and the time of the plasma exposure to the samples.

Once all the parametres are studied two more tests are done, with the aim of proving the proposed theories towards them are true, obtaining in the two tests a really accurated and efficient bonding with a bonding strengh quite similar to the one we predicted.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xviii
Notación	xx
1 Introducción	1
2 Tecnologías MEMS	3
2.1. <i>Historia</i>	4
2.2. <i>Tipos de MEMS y aplicaciones</i>	7
2.3. <i>Materiales usados para el desarrollo de sistemas MEMS</i>	8
2.3.1. Silicio	8
2.3.2. Polímeros	8
2.3.3. Metales	9
2.3.4. Materiales cerámicos	9
2.4. <i>Procesos de Fabricación</i>	9
2.4.1. Procesos de deposición	9
2.4.2. Patterning	10
2.4.3. Procesos de Etching	10
2.4.4. Sputtering	10
3 Estado del Arte	11
1. <i>Polidimetilsiloxano (PDMS)</i>	11
3.1.1. Composición	11
3.1.2. Propiedades	12
3.1.3. Aplicaciones	13
2. <i>Plasma de oxígeno</i>	13
3.2.1. Parámetros y propiedades	14
3.2.2. Procesos de ataques con plasma en las MEMS	15

3. <i>Pegado del PDMS mediante plasma de oxígeno</i>	19
4 Pruebas y Resultados	23
4.1. <i>Fabricación del PDMS</i>	23
4.2. <i>Descripción de equipos y herramientas</i>	24
4.2.1. <i>PDMS Utilizado</i>	24
4.2.2. <i>Generador de plasma Zepto 114458</i>	25
4.3. <i>Montajes y primeras pruebas</i>	26
4.3.1. <i>Primer montaje: Tubos de plástico revestido</i>	26
4.3.2. <i>Segundo montaje: Junta de unión mediante tubos</i>	27
4.3.3. <i>Tercer montaje: Junta mediante tubos con refuerzo de silicona</i>	30
4.3.4. <i>Montaje final: Pieza especial para el anclado</i>	31
4.4. <i>Pruebas finales y resultados</i>	32
5 Conclusiones	37
5.1. <i>Conclusiones</i>	37
5.2. <i>Futuras líneas de investigación</i>	38
Anexo A	41
Anexo B	43
Anexo C	47
Referencias	11

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2–1. Cronología de los avances en la microelectrónica y las MEMS	5
Tabla 4–1. Parámetros y resultados obtenidos durante las pruebas realizadas con el montaje 1.	27
Tabla 4–2. Parámetros y resultados obtenidos durante las pruebas realizadas con el montaje 2.	28
Tabla 4–3. Parámetros y resultados obtenidos durante las pruebas realizadas con el montaje 3.	30
Tabla 4–4. Parámetros y resultados obtenidos durante las pruebas realizadas con el montaje final.	32
Tabla 4–5. Parámetros y resultados obtenidos durante las pruebas realizadas con el montaje final con variaciones de la masa.	33
Tabla 4–6. Parámetros y resultados obtenidos durante las pruebas realizadas con el montaje final con variaciones de la presión del gas introducido para generar el plasma.	34
Tabla 4–7. Parámetros y resultados obtenidos durante las pruebas finales donde se puede apreciar que se han obtenido los resultados esperados.	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Comparación entre diferentes escalas en cuanto a seres, átomos, materiales y radiaciones	3
Figura 2-2. Representación gráfica de la Ley de Moore hasta 2015.	5
Figura 3-1. Estructura de una cadena de monómeros de PDMS	12
Figura 3-2. Aplicación con electrodos sobre vidrio para actuar en un dispositivo microfluídico basado en PDMS	13
Figura 3-3. Ilustración del proceso de limpieza de superficies con plasma	16
Figura 3-4. Ejemplo visual del proceso de limpieza de superficies con plasma	16
Figura 3-5. Ilustración del proceso de activación de superficies con plasma	17
Figura 3-6. Superficie antes y después de la activación con plasma	17
Figura 3-7. Ilustración del proceso de recubrimiento con plasma	18
Figura 3-8. Ejemplo visual de recubrimiento con plasma	18
Figura 3-9. Ilustración del proceso de etching con plasma	19
Figura 3-10. Prueba para medir la fuerza de pegado mediante uso de aire comprimido	21
Figura 3-11. Gráfica de comparación entre diferentes técnicas de pegado del PDMS	21
Figura 4-1. Equipo Zepto 114458	25
Figura 4-2. Montaje mediante tubos de plástico revestido	26
Figura 4-3. Montaje mediante tubos de plástico revestido reforzado	28
Figura 4-4. Colección de muestras realizadas con el montaje 2	29
Figura 4-5. Muestras recién fabricadas empleando el montaje 3 antes de aplicar la silicona.	30
Figura 4-6. Muestra con el montaje final, vista en planta y perfil	31
Figura 4-7. Entrada de aire con y sin refuerzo	32
Figura 4-8. Muestra de la burbuja formada por el aire en el interior de la muestra	33
Figura 5-1. Representación gráfica de la calidad del pegado respecto a las variables que intervienen en el proceso.	38

Notación

PDMS	Polidimetilsiloxano
MEMS	Micro-Electromechanical Systems (el inglés de sistema electromecánico)
mbar	Milibar, unidad de presión
g	Gramo, unidad de masa
s	Segundo, unidad de tiempo

1 INTRODUCCIÓN

En este trabajo se estudiará un material utilizado en el mundo de las tecnologías MEMS, y en sus procesos de fabricación y tratamiento para su utilización y aplicación. En los últimos años las tecnologías MEMS han evolucionado vertiginosamente, y se ha adoptado en muchas industrias, tales como las telecomunicaciones, biomedicina, y domótica entre otras. Con el auge de las electrónicas de consumo, cada vez se exigen más avances y mejoras en este campo como pueden ser el consumo y la capacidad de procesamiento, y las tecnologías MEMS han desarrollado una tendencia a cubrir todas estas necesidades por parte del público, convirtiéndose en un futuro posible pilar fundamental en las investigaciones tecnológicas de los años venideros.

El material sobre el que trata este Trabajo de Fin de Grado es el Polidimetilsiloxano (PDMS), un material que posee propiedades muy interesantes para el mundo de las MEMS para sistemas de microfluidos y la bioingeniería. Se realizará un estudio exhaustivo sobre su proceso de fabricación y adhesión para las aplicaciones que se realicen con este material. El trabajo está sumado a las líneas de investigación del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla (DINEL) y relacionado con las asignaturas Microsistemas y Tecnología Electrónica, impartidas por los profesores Jose Manuel Quero Reboul y Jorge Jesús Chávez Ordáez, respectivamente, dentro de las titulaciones de Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación y Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales.

Se contará para el desarrollo del trabajo con el equipamiento de los laboratorios del Departamento de Ingeniería Electrónica, así como se encuentra un punto de partida en algunos estudios realizados en otras universidades sobre los procesos de adhesión del PDMS con otros materiales. El PDMS es un material que una vez que ha curado y tomado forma es difícil de trabajar, pues su composición molecular le hace repeler cualquier otra sustancia a la que se pretenda unir. No obstante, se ha comprobado que la adhesión de este material curado es posible mediante la exposición a plasma de oxígeno. Este proceso de ataque al material permite su posterior pegado con otra cara de PDMS y otro material que haya sido atacado, quedando un resultado aceptable para las MEMS.

Dicho esto, el objetivo de este trabajo es el estudio y la optimización de esta técnica, mediante pruebas y ensayos de fabricación, pegado y despegado estudiando todas las variables del proceso. Una vez este proceso quede caracterizado y obtengamos las pautas que optimicen los resultados, podremos llevar a cabo aplicaciones con el PDMS tales como canales para microfluidica, circuitos electrónicos flexibles e incluso abrir una ventana al mundo de los órganos biónicos.

2 TECNOLOGÍAS MEMS

Se denominan MEMS (del inglés Microelectromechanical Systems) a aquellos sistemas que hacen uso de la electromecánica a escalas micrométricas. Son sistemas en miniatura que están destinados a una tarea especial e involucran uno o más componentes que actúan como sensores o actuadores, a menudo formando parte de un sistema de orden superior más complejo.

Estos sistemas micromecanizados han ganado ventaja en los mercados debido al avance en el campo de los semiconductores y la creciente necesidad del mercado a optimizar en cuanto a tamaño y consumo se refiere. Los tipos de dispositivos MEMS pueden ir desde estructuras simples sin movilidad hasta grandes sistemas complejos donde los elementos se mueven bajo la supervisión de un sistema electrónico integrado. La gran variedad de materiales y técnicas de fabricación, junto a las numerosas aplicaciones que se les puede dar hacen que sea sencillo integrarlas en un microchip, y por tanto, utilizable en muchas áreas donde necesitemos electrónica a escalas reducidas. Las MEMS varían desde la micra (millonésima parte de un metro) hasta un milímetro, consiguiendo un comportamiento algo independiente de las leyes de la física clásica. La acción de la fuerza gravitatoria se hace muy pequeña, casi despreciable, pudiendo crear piezas móviles que se mantengan “flotando” sobre el sistema; los efectos de superficie dominan a los de volumen, por tanto la electrostática tendrá más relevancia que por ejemplo la inercia. Esto nos ofrece una ventana a aplicaciones con las que no podríamos soñar a escalas mayores.

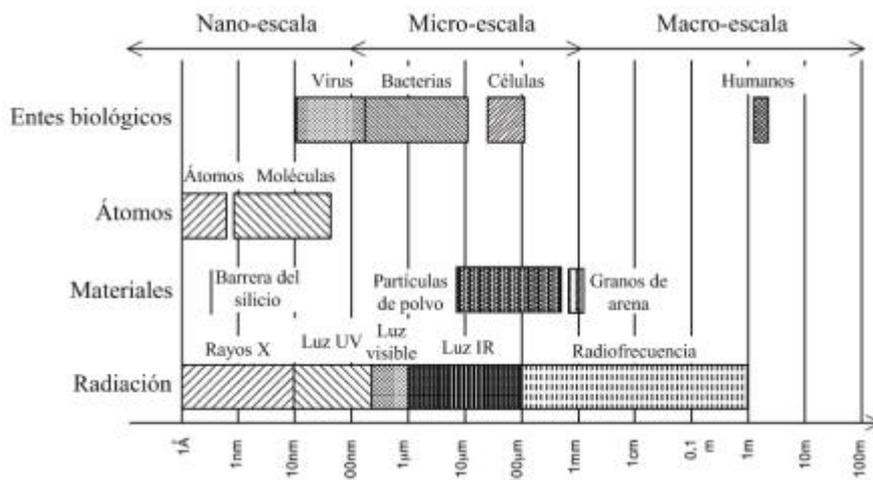


Figura 2-1. Comparación entre diferentes escalas en cuanto a seres, átomos, materiales y radiaciones.

La motivación para la utilización de las MEMS sobre otras tecnologías es que ofrece menores coste, consumo y peso, mientras que mantiene un alto nivel de versatilidad y aplicación. Este apartado pretende que el lector entre en el mundo de los microsistemas MEMS para una mayor comprensión de este trabajo, y para ello se hablará de todo lo concerniente a este tema, desde los orígenes de estas tecnologías hasta las aplicaciones que tienen en la actualidad, así como materiales y procesos de fabricación.

2.1. Historia

La historia de las MEMS está implícitamente ligada a la historia de la microelectrónica y a su búsqueda de fabricar circuitos electrónicos de menores tamaño y consumo. No resulta desconocido que el origen de los sistemas microelectrónicos así como de la electrónica moderna es la invención del transistor. En 1947 el primer transistor de punto de contacto fue creado por Bardeen y Brattain y posteriormente Shockley inventó el primer transistor de efecto de campo en 1952. El transistor trajo consigo un gran avance gracias a su tamaño reducido, su bajo consumo energético, su producción de calor y su portabilidad. Se estudiaron las características de los materiales semiconductores y se empezaban a unir los materiales de la electrónica (Silicio, Germanio) con los sistemas mecánicos. En la década de 1950 se produjeron muchos eventos que motivaron el desarrollo de la electrónica mucho más allá del transistor. La invención del transistor planar de silicio y su proceso de fabricación abrieron la ventana al desarrollo de los primeros dispositivos monolíticos (integrados en el mismo sustrato) con un tamaño del orden de la micra. Este proceso de fabricación planar nos abría el camino a integrar un número elevado de transistores y a fabricar dispositivos electrónicos con diversos fines. Esto junto al avance de los procesos de fabricación descubiertos (litografía, socavado, difusión...) lograron una continua reducción del tamaño de los transistores[6].

Fue en el 1970 cuando se desarrolló el primer microprocesador, lo que mejoró bastante la resolución de los procesos de litografía. Con todos estos avances en los procesos de fabricación se empezaron a diseñar sistemas en chips que registraban fenómenos físicos y podían activar actuadores y acondicionar la señal procedente del sensor para su posterior transmisión, completando el ciclo de captura de información, procesamiento, transmisión y actuación. Estos sistemas ya contaban con cierta inteligencia artificial y sentarían la base de las MEMS tal y como las conocemos. Fue en diciembre de 1959 cuando el doctor Richard Feynman durante una reunión de la Sociedad Americana de Física en el Instituto Tecnológico de California señaló las posibilidades de la miniaturización y mejora de las capacidades de procesamiento de las computadoras y las aplicaciones y consecuencias que esto podía aportar a otras ramas del conocimiento. Al final de la conferencia el Dr. Feynman ofreció premios para aquellos quienes resolvieran retos tecnológicos que impulsaran la miniaturización. El primero consistía en introducir todo el texto de una página en un área de 1/25000 de pulgada cuadrada en escala lineal, para que pudiese ser leído por un microscopio electrónico. El segundo consistía en diseñar un motor eléctrico de un tamaño de 1/64 pulgadas cúbicas. Fue cinco años después cuando se creó el primer sistema microelectromecánico: el transistor de compuerta resonante, empleando procedimientos de fabricación de microelectrónica sobre silicio, de la mano de H.C. Nathanson [6].

El rápido desarrollo de la microelectrónica fue comprendido y explicado por Gordon Moore en 1965 en un artículo donde se publicó la ahora conocida Ley de Moore [6]. En aquel año se producían circuitos integrados con 50 transistores en obleas de una pulgada cuadrada, los cuales debían estar separados por 50 micras y usaban silicio como sustrato debido a la facilidad del material para la producción es obleas estables y de alta calidad. Moore publicó en su artículo la ahora conocida como Ley de Moore:

“... La complejidad del componente (microelectrónico) de menor costo se ha incrementado en un factor de dos por año aproximadamente. En lo inmediato se espera que esta tendencia se mantenga o se incremente. Y en el largo plazo, la tasa de incremento es un poco incierta, aunque no existe razón para creer que no se mantendrá más o menos constante, al menos, por los próximos diez años. “

Gordon Moore, 1965.

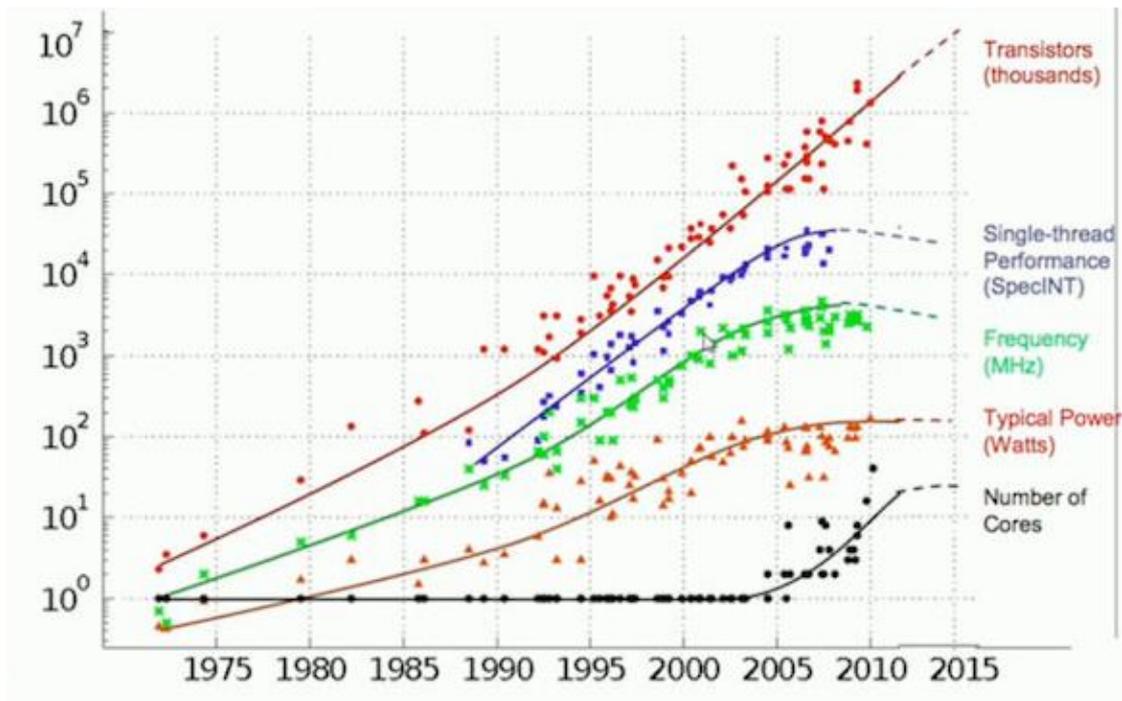


Figura 2-2. Representación gráfica de la Ley de Moore hasta 2015. Se representan en la figura tanto la densidad de transistores como otras magnitudes relacionadas con los microsistemas electrónicos.

En 1979 el primer acelerómetro basado en tecnologías MEMS fue desarrollado por investigadores de la Universidad de Stanford y se convirtió en un éxito comercial, habiéndose vendido más de 30 millones de microacelerómetros fabricados sobre silicio por todo el mundo [6]. Durante los años posteriores, numerosos avances importantes fueron logrados en la microelectrónica y sus procesos de fabricación. El ritmo vertiginoso de la electrónica tuvo un boom considerable con el abaratamiento de ésta a finales del siglo, y las investigaciones abrían nuevos campos y líneas de aplicación para las MEMS.

Tabla 2-1. Cronología de los avances en la microelectrónica y las MEMS.[3]

Año	Eventos
1940	La invención del radar impulsa al desarrollo de los semiconductores.
1947	Se inventa el ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) en la Universidad de Pennsylvania.
1954	Bardeen, Brattain y Shockley inventan el transistor de unión bipolar en los Laboratorios Bell.
1959	El Dr. Richard Feynman ofrece su famosa conferencia <i>There's plenty of room at the bottom</i> en el Caltech.
1960	Se inventa el proceso de fabricación planar por lotes (en serie y empleando una misma máscara) sobre silicio.
1961	Kulite Semiconductor desarrolla a nivel experimental un sensor de presión basado

	en silicio.
1964	H.C. Nathanson y su equipo producen en Westinghouse el transistor de compuerta resonante, considerado el primer sistema microelectromecánico.
1965	Gordon Moore formula la famosa ley que lleva su apellido como nombre. En ella establece la tendencia a largo plazo entre la densidad de transistores por unidad de área en la fabricación microelectrónica.
1970	Se inventa el microprocesador y se incrementa enormemente la demanda de circuitos integrados.
1974	National Semiconductor desarrolla el primer sensor comercial de presión basado en tecnología MEMS.
1977	IBM y Hewlett-Packard desarrollan la primera cabeza de inyección de tinta empleando tecnología MEMS.
1979	El acelerómetro micromaquinado es desarrollado por la Universidad de Stanford.
1981	Aparece el artículo <i>Protein design as a pathway to molecular manufacturing</i> de K. Eric Drexler constituyéndose en el primer artículo técnico sobre nanotecnología que es publicado.
1982	Se inventa el microscopio de efecto túnel. Kurt E. Petersen publica en su famoso artículo <i>Silicon as a mechanical material</i> en el cual analiza las propiedades mecánicas del silicio a la escala de fabricación de los microsistemas. Honeywell desarrolla un transductor de presión sanguínea empleando tecnología MEMS.
1984	El proceso de micromaquinado superficial en silicio policristalino es desarrollado en la Universidad de California en Berkeley. Los circuitos electrónicos y los sistemas microelectromecánicos pueden ser fabricados juntos por primera vez.
1986	Se inventa el microscopio de fuerza atómica. Se inventa el proceso LIGA para fabricar microsistemas en el Instituto de Ingeniería Nuclear del Centro de Investigación Karlsruhe en Alemania.
1987	Texas Instruments inventa el dispositivo digital de microespejos o DMD.
1989	Es inventado el actuador electrostático conocido como peine electrostático lateral.
1991	Es inventada la bisagra de polisilicio en procesos de maquinado superficial. Se descubre el nanotubo de carbón.
1993	Analog Devices introduce en el mercado el acelerómetro micromaquinado ADXL50.
1996	Texas Instruments introduce en el mercado su DLP que contiene un DMD desarrollado por su propia empresa. Richard Smalley desarrolla una técnica para producir nanotubos de carbón de diámetro uniforme.
2002	Analog Devices introduce en el mercado su giroscopio micromaquinado ADXRS.

Los Sistemas Microelectromecánicos (MEMS) se han consolidado como el resultado de la investigación de la segunda mitad del siglo XX para satisfacer las necesidades tecnológicas y comerciales. La búsqueda de la miniaturización de los circuitos electrónicos y la favorabilidad de los procesos para conseguir este fin han impulsado el éxito comercial de las MEMS durante estos últimos años y probablemente también para futuras investigaciones y aplicaciones.

2.2. Tipos de MEMS y aplicaciones

Dados su tamaño y operatividad, los dispositivos MEMS pueden ser utilizados y configurados para realizar tareas y operaciones de forma independiente o como parte de un sistema complejo. La naturaleza del microsistema puede ser eléctrica, magnética, óptica, térmica, mecánica o fluidica y el MEMS puede albergar circuitos electrónicos, ópticos, de señal, microsensores y microactuadores, y microgeneradores [2].

Podemos clasificar los microsistemas en distintos tipos:

- **Sensores:** Estos dispositivos detectan y miden cambios en alguna magnitud determinada. Existen diversos tipos de sensores: movimiento, químicos, térmicos y ópticos.
- **Actuadores:** Interactúan con el medio estimulando alguna magnitud o realizando alguna tarea que altere el medio.
- **MEMS RF:** Son dispositivos que transmiten señales de radiofrecuencia. Pueden ser emisores o receptores.
- **MOEMS (Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems):** Son dispositivos diseñados para manipular la luz mediante cambios de dirección, reflexión, amplificación... Estos componentes constituyen dispositivos ópticos.
- **MEMS para microfluidos:** Son dispositivos cuya finalidad es trabajar con fluidos. Son ampliamente usados en este campo las microbombas y microválvulas para producir movimiento en pequeñas cantidades de fluido.
- **BioMEMS:** Son dispositivos MEMS para microfluidos con aplicaciones biológicas. Están diseñados para trabajar con proteínas, células, sustancias médicas, etc que puedan usarse con seres vivos.

Mientras que todos estos tipos tienen aplicaciones completamente diferentes, todas ellas se encuentran en uso y desarrollo para aplicaciones comerciales con distintos fines. Un sistema comercial complejo puede combinar varios tipos de MEMS en su arquitectura si necesita de ellos para llevar a cabo su funcionalidad. Es por ello que los sistemas microelectrónicos contienen microactuadores, microsensores, microelectrónica y microestructuras. Las aplicaciones de las MEMS son innumerables y se utilizan en un sin fin de industrias y mercados. El auge de la electrónica de consumo de las últimas décadas ha producido una necesidad de sistemas de menor consumo energético, mayor potencia de procesamiento y menor tamaño, para la fabricación de electrodomésticos y dispositivos electrónicos portátiles como tablets, teléfonos móviles y electrodomésticos.

Por otro lado, el mundo de las telecomunicaciones ha podido beneficiarse de las MEMS. La utilización de sistemas de telecomunicación basados en fibra óptica ha crecido considerablemente y el número de fabricantes de dispositivos y componentes ópticos se ha disparado. La alta precisión que requieren las conexiones ópticas y la sensibilidad de esta tecnología a los desalineamientos hacen de los microsistemas una solución barata y eficiente. Fijar fibras de entrada y salida mediante canales micromecanizados ahorra muchísimo en tareas de alineamiento complejas y costosas. Además, las MEMS pueden usarse para fabricar otros elementos ópticos, como guías de onda y divisores de haz.

En cuanto a tecnologías de sensores y actuadores, existen en la actualidad más de un millar de dispositivos que realizan tareas entorno a ellos en el mundo doméstico y en el mundo comercial. Sensores de humedad,

temperatura, movimiento y químicos se usan día a día en multitud de aplicaciones. Con la creciente tendencia Internet of Things (IoT) la creación de redes de sensores para domótica y monitorización de sistemas y espacios físicos el uso de sensores y actuadores ha encontrado otro mercado importante donde se abre posibilidad a la invención de nuevos dispositivos. Por último, en el sector de las BioMEMS se están desarrollando dispositivos biocompatibles con el ser humano para la detección y diagnóstico de enfermedades y problemas a nivel celular, tales como herramientas de diagnóstico de cáncer o alteraciones indetectables por otros sistemas para el diagnóstico. La bioingeniería encuentra en las BioMEMS una potente arma para identificar agentes perjudiciales para el organismo y mediante actuadores puede combatir y regular dichos agentes. Estas y muchas más son las aplicaciones para las que las MEMS pueden ser empleadas e investigadas.

2.3. Materiales usados para el desarrollo de sistemas MEMS

Con la evolución de la electrónica se han investigado diferentes materiales como posibles alternativas al silicio para el desarrollo y fabricación de sistemas microelectrónicos. Diferentes aplicaciones necesitarán diferentes características en cuanto a los materiales a utilizar, considerando condiciones de entorno y de funcionamiento específicas según la finalidad del dispositivo. Se describirán en este apartado algunos de los materiales más utilizados en las MEMS [4].

2.3.1. Silicio

El silicio es el segundo elemento químico más abundante del planeta. No se presenta en la naturaleza en su estado libre, sino como dióxido de silicio o algún silicato complejo. El silicio es el material usado para crear la mayoría de los circuitos integrados que se utilizan en la electrónica de consumo de la industria moderna. Las economías de escala, la disponibilidad de materiales de alta calidad y bajo precio, y la habilidad de incorporar funcionalidades electrónicas hacen del silicio un material atractivo para una amplia variedad de aplicaciones MEMS. Es un semiconductor intrínseco y su resistividad a la corriente eléctrica a temperatura puede variar desde la de los metales hasta la de los aislantes. Puede manipularse su conductividad mediante la adición de impurezas denominadas sustancias dopantes.

Esta manipulación de la conductividad junto a su abundancia en la naturaleza han posibilitado el desarrollo y la implementación de transistores y circuitos integrados en la industria. Las tecnologías de micromecanizado del silicio, tanto en volumen como en superficie han permitido el desarrollo de nuevos elementos sensores y actuadores, así como han permitido aprovechar las buenas capacidades mecánicas del silicio.

Dadas las mejoras en sistemas y procesos de fabricación de silicio, se ha extendido su uso hasta el día de hoy, y es la base de la gran mayoría de sistemas electrónicos que conocemos. Aunque no es de extrañar que en un futuro cercano siga siendo la base para la fabricación de circuitos integrados. No obstante, es importante investigar procedimientos para compatibilizar los sistemas microelectrónicos de silicio con aquellos construidos sobre otros materiales, así como optimizar la fabricación de sensores y actuadores con las tecnologías actuales para la fabricación de circuitos integrados.

2.3.2. Polímeros

Aunque la industria electrónica provee una economía de escala para la industria del silicio, el silicio puro sigue siendo un material complejo y relativamente caro a la hora de producirlo. Los polímeros, por otro lado pueden producirse en grandes volúmenes, con una gran variedad de características materiales según lo requiera la aplicación. Los dispositivos MEMS pueden desarrollarse con polímeros mediante procesos determinados y son realmente versátiles en cuanto a aplicaciones con microfluidos. Existen principalmente cuatro procesos básicos para su fabricación: moldeo, unión, eliminación de capas residuales y formación de electrodos sobre el material.

Los polímeros aportan a las MEMS altos niveles de flexibilidad, transparencia a la luz para utilidades ópticas,

sensibilidad térmica, biocompatibilidad y biodegradabilidad. Por ello son los más adecuados para aplicaciones biomédicas y tratamiento de sustancias biológicas. Tienen un coste relativamente bajo, y sus procesos de fabricación son seguros, ya que evitan el uso de sustancias químicas como ácidos para su fabricación.

Entre los polímeros más utilizados podemos destacar el SU-8 y el polidimetilsiloxano (PDMS). El SU-8 es una fotorresina epoxy negativa muy utilizada debido a sus excelentes propiedades mecánicas y químicas, su biocompatibilidad y su bajo coste. Es un material transparente y rígido que permite la creación de estructuras multicapa para diversos fines, como por ejemplo fabricar capas con inclinaciones para dar lugar a microespejos y microlentes. Es sensible a la luz UV (unos 365nm de longitud de onda) y su proceso de fabricación es sencillo y barato.

Por otro lado, el polidimetilsiloxano (PDMS) tendrá un papel protagonista en este trabajo, siendo un polímero con unas propiedades aún más beneficiosas para algunas aplicaciones, como una flexibilidad notable y una transparencia mayor a la del SU-8.

2.3.3. Metales

Los metales también pueden ser utilizados para crear elementos en las MEMS. Aunque los metales no tienen algunas de las ventajas agregadas del silicio en cuanto a propiedades mecánicas, si se utilizan con cautela, los metales pueden ofrecer grados muy altos de fiabilidad. Una de las aplicaciones más extendidas es su uso para crear pistas o zonas con conductividad eléctrica para dar origen a microcircuitos electrónicos. Los metales pueden ser depositados mediante procesos de evaporación y sputtering. Algunos de los metales más empleados incluyen el oro, el níquel, el aluminio, el cobre, el cromo, el titanio, el tungsteno, el platino y la plata.

2.3.4. Materiales cerámicos

Los nitratos del silicio, aluminio y titanio, así como los carburos del silicio y otros materiales cerámicos han sido cada vez más aplicados en la fabricación de MEMS debido a las ventajas que ofrecen su combinación con otros materiales. Los nitratos de aluminio conforman estructuras cristalinas y esto produce propiedades piroeléctricas y piezoeléctricas deseables para sensores con sensibilidad para fuerzas normales y elevadas. Los nitratos de titanio, por otro lado ofrecen una alta conductividad eléctrica y una elasticidad considerable, que permiten planificar sistemas de actuación para membranas electrostáticas muy finas. Además la alta resistencia de los nitratos de titanio contra la biocorrosión hacen al material un buen candidato para entornos biomédicos.

2.4. Procesos de Fabricación

Los avances de la electrónica y la invención de los primeros circuitos electrónicos y procesadores también impulsaron, paralelamente la mejora de los procesos de fabricación de dichos circuitos electrónicos. Se describirán algunos de los procesos de fabricación de microcircuitos más utilizados hasta la fecha [1].

2.4.1. Procesos de deposición

Una de las técnicas más básicas para construir bloques en las MEMS es la habilidad de depositar pequeñas capas de un material con un espesor de entre unos pocos nanómetros hasta unas 100 micras. Hay dos tipos de procesos de fabricación.

- Deposición física: La deposición física por vapor (PVD) consiste en un proceso en el cual un material es removido de un objetivo, y depositado en una superficie. El material es evaporado usando o calor o un haz de electrones en un sistema en vacío
- Deposición química: la deposición química por vapor (CVD) consiste en el empleo de una corriente de gas que reacciona en el sustrato donde crecerá una capa del material deseado. Esto puede hacerse mediante el uso directo del gas a baja presión (LPCVD) o mediante el uso de plasma.

También pueden crearse capas de óxido mediante la técnica de oxidación térmica, en la que la oblea es expuesta a oxígeno o vapor, para hacer crecer sobre ella una fina capa de dióxido de silicio.

2.4.2. Patterning

Consiste en transferir un patrón prediseñado a un material. Podemos distinguir la litografía y la fotolitografía. En estos casos, una máscara se aplica sobre un sustrato, como por ejemplo el PCB con cobre donde se usará una resina fotosensible. La máscara se colocará de forma alineada sobre el material, y se aplicará luz en una insoladora, quedando grabada la parte deseada según lo establece el patrón de la máscara. Las diferencias principales entre las técnicas de patterning radican en la fuente de luz, que van desde luz solar hasta rayos X.

2.4.3. Procesos de Etching

El etching es un proceso en el cual se elimina un material del circuito en fabricación. Existen dos tipos básicos: etching húmedo y etching seco.

- Etching húmedo: Este proceso consiste en la eliminación selectiva de un material mediante la inserción del material en una solución química que lo disuelve. La sustancia química para este proceso de etching provee una buena selectividad, que otorga una mayor cantidad de material removido en una menor cantidad de tiempo.
- Etching seco: En este proceso se emplea un gas o iones para atacar el material, eliminando las partes seleccionadas. Es un proceso más lento, pero aporta mucha precisión y un mejor acabado.

2.4.4. Sputtering

Este proceso permite aplicar partículas de un material específico rociándolas con iones para bombardear la superficie de un material. Los iones para el proceso se obtienen de un plasma generado en el interior del equipo de pulverización. Las propiedades de este plasma pueden modificarse mediante técnicas. En concreto, la densidad de iones es clave para pulverizaciones óptimas. Los átomos pulverizados no están en su estado de equilibrio termodinámico y se condensan de nuevo en estado sólido al chocar con cualquier superficie de la cámara, creando aglomeraciones en las paredes de la cámara de pulverización. El proceso podría dañar la superficie del material, pero da buenos resultados para crear películas finas de material con las que trabajan los procesos de etching y deposición. También permiten la adición de partículas de metal sobre un material no conductor para crear pistas para circuitos electrónicos y resinas para futuras intervenciones fotolitográficas.

3 ESTADO DEL ARTE

Bien es sabido que en todo buen trabajo de investigación ha habido una extensa documentación previa a la realización de dicho trabajo. Este no es una excepción y dedicaremos este apartado a describir todos los aspectos y detalles de las investigaciones y documentos que se han encontrado y han aportado información y conocimientos valiosos al trabajo.

Comenzaremos introduciendo de un modo más exhaustivo al PDMS como material, pasando por todo su flujo de vida, desde su creación hasta su aplicación. También hablaremos del plasma de oxígeno, de los procesos de fabricación que lo involucran y de cómo se puede utilizar para el pegado del PDMS, así como otras técnicas para este fin. Por último, hablaremos del futuro de estas tecnologías en el mundo de las MEMS.

1. Polidimetilsiloxano (PDMS)

El polidimetilsiloxano o PDMS, también denominado dimeticona, es un polímero perteneciente a los compuestos de organosilicio, generalmente conocidos como siliconas. Basado en el silicio, presenta unas propiedades inusuales. Es transparente, inerte, no inflamable, flexible, hidrófobo y biocompatible. Todo esto hace que sea ampliamente usado en múltiples campos e industrias. Se encuentra presente en multitud de productos, tales como champús, cremas y cosmética, e incluso en algunos alimentos como conservantes, lubricantes y aceites [4].

Sus propiedades interesantes son muy destacables y útiles para multitud de propósitos. En la biomedicina, puede ser utilizado para un gran número de aplicaciones, desde lentes de contacto hasta elastómeros. En las MEMS de esta disciplina es un material más que apropiado para implantes biocompatibles y sistemas microfluídicos. En la electrónica sus propiedades son muy deseables para la fabricación de componentes como condensadores o fusibles, dado que es un material poco conductivo y un excelente aislante térmico.

Otra gran ventaja del PDMS es su precio, pues tanto el polímero como los procesos de fabricación son baratos y factibles, no necesitando más que un agente curante y un horno para fabricarlo. Esto amplía el número de investigaciones con este material, ya que con un bajo coste y unas propiedades fantásticas, el PDMS podría ser la base de desarrollos tecnológicos importantes en un futuro no muy lejano.

3.1.1 Composición

El polidimetilsiloxano se obtiene a raíz del dióxido de silicio. Algo de química iluminará la comprensión del lector sobre el material. La fórmula empírica del PDMS es $CH_3[Si(CH_3)_2O]_nSi(CH_3)_3$ siendo “n” el número de unidades monoméricas $[SiO(CH_3)_2]$. Comercialmente se presenta en dos componentes: una base de monómero que contiene vinil-dimetilsiloxano terminado con un catalizador de platino, y un agente de curado de hidruro-dimetil siloxano terminado. La adición del catalizador de platino ayuda entre el grupo funcional vinilo de la base del monómero ($SiCH = CH_2$) y el grupo funcional hidruro (SiH) presente en el

catalizador, lo que termina con el curado de la mezcla de los dos componentes. A esta reacción se le denomina hidrosilación catalítica [8].

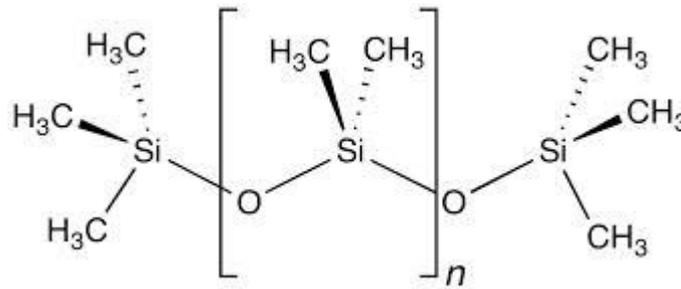


Figura 3-1. Estructura de una cadena de monómeros de PDMS.

Dependiendo del tamaño de la cadena de monómeros, los enlaces del PDMS pueden ser casi líquidos (para valores de “n” bajos) o semi-sólidos (para valores de “n” altos). Los enlaces del siloxano permiten obtener un polímero flexible con un alto nivel de viscoelasticidad. Tras la polimerización y reticulación, el PDMS se transforma en un elastómero hidrófobo, capaz de soportar altas temperaturas y buen aislante eléctrico.

3.1.2 Propiedades

Se ha hablado de unas propiedades fascinantes en este material para la fabricación de MEMS. En este apartado se van a describir dichas propiedades y a comentar brevemente su utilidad en diversas aplicaciones MEMS [8].

- Es un material transparente para longitudes de onda desde los 240 nm hasta los 110 nm. Esto lo hace un buen material para aplicaciones ópticas, pues puede ser atravesado por todas las longitudes visibles facilitando la observación de los contenidos de 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.
- Es un material biocompatible, y muy usado para aplicaciones biomédicas como implantes mamarios y prótesis vasculares. También es muy útil para el desarrollo de herramientas de diagnóstico médico para detección óptica de elementos en microfluidos.
- Es barato comparado con otros materiales empleados en las MEMS, y sus procesos de fabricación también.
- Es 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, con un módulo de Young de 1.5 MPa. Esto nos ofrece el poder crear dispositivos y circuitos flexibles.

3.1.3 Aplicaciones

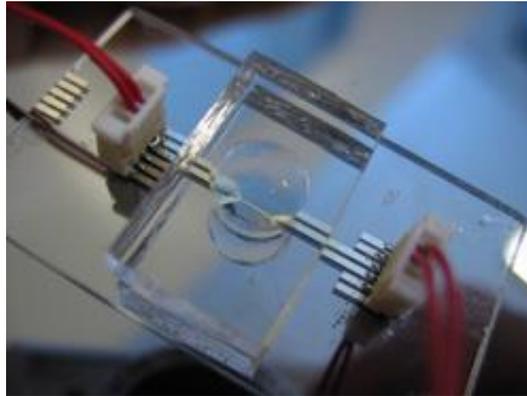


Figura 3-2. Aplicación con electrodos sobre vidrio para actuar en un dispositivo microfluídico basado en PDMS.

El PDMS puede ser utilizado en una gran variedad de aplicaciones y es una gran solución para muchos desafíos de fabricación. Unido a otros materiales o procedimientos, puede aportar mejoras en eficiencia o características. Podemos encontrar utilidades al PDMS en muchos mercados:

- **Microelectrónica:** Como se ha mencionado a lo largo de esta memoria, en el mundo de las MEMS, es un buen material para la fabricación de todo tipo de elementos, como lentes, válvulas, filtros o sensores. Sus propiedades son muy explotables en este mundo y su bajo coste de obtención y fabricación aportan grandes ventajas en este campo.
- **Productos de consumo:** El PDMS ha sido un renombrado conservante para alimentos no tóxico y biocompatible, y puede encontrarse en una gran gama de alimentos, productos de limpieza, higiene y cosmética.
- **Envases:** Las propiedades de este material para repeler agentes externos y líquidos se aprovechan para la creación de partículas de plástico para proteger alimentos, recipientes plásticos y cajas flexibles.
- **Cableado y conexiones:** En la creación de cables se aprovechan sus bajas conductividades eléctrica y térmica, así como su flexibilidad. También se ha estudiado su uso para la fabricación de fibras ópticas y estructuras con amplio rango de diámetros y longitudes.
- **Ingeniería aeroespacial y automovilismo:** En estas áreas el uso de sensores está a la orden del día. No obstante, estas industrias están constantemente sometidas a unas condiciones de entorno y diseño para el producto que invalidan a algunos materiales el formar parte de estos proyectos. El PDMS puede ser utilizado para trabajar a altas y bajas temperaturas, diferentes grados de presión atmosférica y humedad, por lo que se están investigando nuevas tecnologías entorno a él para estos mercados.
- **Bioingeniería:** Al ser un material biocompatible se están estudiando una infinidad de aplicaciones biomédicas para este material. Gracias a sus grandes capacidades para la microfluídica y sensores, se pueden realizar muchísimos avances en este campo que está sometido a una evolución constante.

2. Plasma de oxígeno

En su definición más generalista, el plasma es el cuarto estado de agregación de la materia. En este estado las partículas están cargadas eléctricamente y no poseen equilibrio electromagnético, por lo que se ven altamente

influenciadas por las interacciones electromagnéticas. El plasma presenta propiedades de las que los sólidos, líquidos y gases carecen. Al igual que en los gases, el plasma no alcanza formas o volúmenes fijos a menos que estén retenidos en un recipiente, pero a diferencia de este, el plasma puede cambiar su forma ante la existencia de campos electromagnéticos. Las formas que el plasma puede adoptar pueden variar pero los más notables son los rayos y resplandores.

Es producido cuando un gas es elevado a altas temperaturas y sus moléculas se ionizan formando iones. La ionización puede ser inducida también mediante el uso de campos electromagnéticos o mediante un láser o generador de microondas, y a menudo implica la disociación de enlaces covalentes.

El plasma ha tenido desde su descubrimiento numerosas aplicaciones y utilidades en la industria y en especial con el procesamiento de materiales. Cuando el plasma entra en contacto con un material sólido éste genera una envoltura. Esto nos permite abusar de él para procesos de grabado, deposición, laminación, etc.

Algunos productos que se fabrican mediante el uso de plasmas son chips electrónicos y circuitos integrados, discos duros, herramientas, implantes y prótesis médicos, cintas de video, partes de motores de automóviles y aviones, y componentes para comunicaciones de datos y voz. Los medios para producir plasmas más habituales son las descargas mediante baja presión y radiofrecuencia, las microondas o las radiaciones inductivamente acopladas [9].

3.2.1 Parámetros y propiedades

Los parámetros que caracterizan el plasma son variados y en este apartado se describirán los más notables de forma enumerada [5].

3.2.1.1 Neutralidad y especie

En general el plasma carece de carga pues está conformado por un número igual de cargas positivas y negativas, quedando lo que se denomina un plasma neutro. También existen plasmas no neutros o casi neutros, como el flujo de electrones dentro de un acelerador de partículas.

3.2.1.2 Longitud de onda plasmática

La longitud de onda plasmática, también denominada longitud de Debye, o de apantallamiento electromagnético, determina el rango de las interacciones electrostáticas de una determinada especie. Suponiendo una cierta carga positiva presente en un plasma de electrones e iones los electrones serán atraídos y formarán una capa de carga negativa a su alrededor. A partir de una distancia determinada la carga habrá quedado neutralizada y no tendrá efectos apreciables. La longitud de Debye es una estimación de esa distancia. En un gas con una densidad de electrones n_e y temperatura T tendremos:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{kT}{4\pi n_e^2}}$$

Ecuación 3-1. Definición de la longitud de onda plasmática o longitud de Debye

Donde k es la constante de Boltzman. Otra longitud a destacar en un plasma es la distancia media entre colisiones, que junto a la longitud de Debye determinan un criterio importante para evaluar las colisiones en el modelo del sistema.

3.2.1.3 Frecuencia del plasma

La frecuencia de un plasma es un parámetro basado en los tiempos característicos de éste. Al aplicar en un

plasma en equilibrio un leve desplazamiento, todos los electrones comenzarán a sentir atracción por los iones en la dirección opuesta y comenzarán a oscilar en torno a la posición original de equilibrio. La frecuencia de oscilación o frecuencia plasmática se puede modelar como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}}$$

Ecuación 3-2. Definición de la frecuencia plasmática.

Donde m_e es la masa del electrón y e la carga del electrón.

3.2.1.4 Velocidad térmica

Existe una relación entre la temperatura de las partículas y su velocidad. Al aumentar la temperatura, las partículas rompen su equilibrio térmico y se dispersan con velocidades variables. A la velocidad cuadrática media se la denomina velocidad térmica y su expresión queda definida como en la ecuación x.x.

$$v_{Te} = \sqrt{\frac{kT_e}{m_e}}$$

Ecuación 3-3. Definición de la velocidad térmica.

3.2.1.5 Parámetro del plasma

El parámetro de plasma indica el número promedio de partículas obtenidas en una esfera con radio igual a su longitud de Debye (esfera de Debye). Este parámetro se modela como:

$$\Gamma = \frac{4\pi n_e \lambda_D^3}{3}$$

Ecuación 3-4. Definición de la frecuencia plasmática.

3.2.2 Procesos de ataques con plasma en las MEMS

El plasma como herramienta para el tratamiento de superficies de comenzó a usar en la industria microelectrónica y se fue extendiendo a otras áreas teniendo una funcionalidad ilimitada para estos fines. Los tratamientos con plasma nos aportan numerosas ventajas en cuanto a la fabricación de dispositivos electrónicos a escalas del orden de la micra.

Nos permite tratar superficies de cualquier tamaño y geometría sin modificar dicho tamaño ni la forma del objeto sobre el que aplicamos el proceso. También es útil sobre multitud de materiales con características diferentes, como semiconductores, tejidos, tubos, circuitos impresos, etc. Estas técnicas no alteran la

temperatura de la muestra por lo cual podemos aplicarlas sobre materiales sensibles a ella, y también pueden utilizarse en cualquier momento y lugar, no necesitando más que los equipos necesarios. Es por todo esto una alternativa versátil, adaptable al proceso de fabricación y con calidad, precio y eficiencia relativamente buenos. Otra de los alicientes al uso de estas técnicas es que no contaminan el medio ambiente, ya que no necesitan de productos químicos. A continuación se describirán algunas de las técnicas que usen plasma más extendidas para la fabricación de dispositivos MEMS [9].

3.2.2.1 Limpieza de superficies

La limpieza por plasma es un método probado, efectivo, económico, ecológico y seguro para tratar una superficie sensible. La superficie del material se limpia por medio de bombardeo con iones por efectos físicos, químicos o bien según el gas empleado para crear el plasma. Las impurezas se transforman en su estado gaseoso al exponerse al plasma y son expulsados fuera de la cámara, quedando una superficie completamente limpia y preparada para la siguiente etapa en su cadena de desarrollo. La tecnología de limpieza por plasma ofrece mejores resultados en la eliminación de contaminantes que cualquier otra técnica de limpieza convencional, como el uso de disolventes. También cuenta con la ventaja añadida de que no necesita de productos químicos para su utilización y por tanto no hay riesgos medioambientales asociados a esta técnica. Entre los componentes sobre los que se puede aplicar esta tecnología destacan componentes electrónicos, componentes para automoción, metales y lentes de contacto y otros componentes ópticos, así como juntas y gomas.

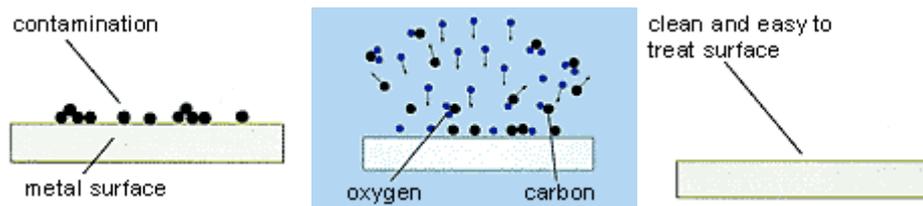


Figura 3-3. Ilustración del proceso de limpieza de superficies con plasma.

La limpieza por plasma se realiza en varias fases. En la primera, la luz ultravioleta generada en el plasma rompe y arranca la mayoría de adhesivos orgánicos y contaminantes superficiales que se encuentran en el material y son arrastrados mediante reacciones químicas con los iones de oxígeno del plasma, haciendo que se formen otras moléculas gaseosas que son expulsadas mediante la bomba de vacío de la cámara. En los plasma generados para la limpieza de metales oxidables en los que no se usa oxígeno las partículas de la superficie son directamente extraídas para no alterar las propiedades del material.

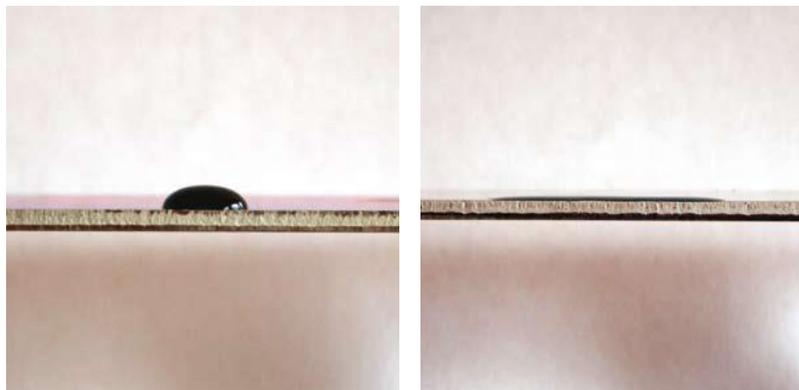


Figura 3-4. Ejemplo visual de limpieza de superficies con plasma.

Los gases para generar el plasma deben ser adecuados para el material sobre el que se desea emplear la técnica. El plasma de argón (Ar) da resultados excelentes sobre metales que se oxidan con facilidad como la plata o el cobre. El plasma de oxígeno (O) es efectivo para eliminar contaminaciones de carácter orgánico como grasas o fluidos. El plasma de hidrógeno (H) es efectivo para eliminar óxidos en las superficies gracias a sus propiedades.

Las industrias que emplean esta técnica con mayor redundancia son las tecnologías médicas, los procesadores de caucho, las industrias electrónica y de fabricación de semiconductores, la tecnología automotriz y las microscopía electrónica. Todas estas áreas explotan la limpieza de superficies para preparar el material para su posterior soldado, impresión o inyección de sustancias, dejando el dispositivo limpio y reduciendo así pérdidas y problemas en su implementación.

3.2.2.2 Activación con plasma de la superficie y modificación de la superficie

Algunos procesos de adhesión o pintado pueden ser difíciles de aplicar si han de usarse sobre un material inerte. La activación por plasma da lugar a un comportamiento que facilita el uso de productos como pinturas o adhesivos. Esto puede aplicarse sobre materiales plásticos y textiles. Muchos polímeros son químicamente inertes y muestran mala adherencia a tintas, pinturas y adhesivos.

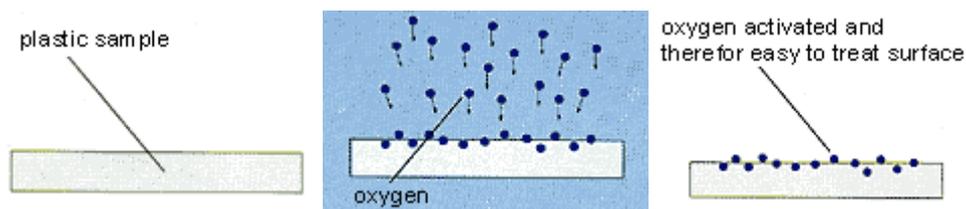


Figura 3-5. Ilustración del proceso de activación de superficies con plasma.

El tiempo que necesita la activación es muy variado, pudiendo oscilar desde pocos minutos hasta meses, dependiendo siempre del material sobre el que se aplica y el tipo de plasma utilizado. Algunos materiales pueden ser sometidos varias veces y en distintos momentos sin comprometer la resistencia del material ni causar roturas o fracturas en el material.

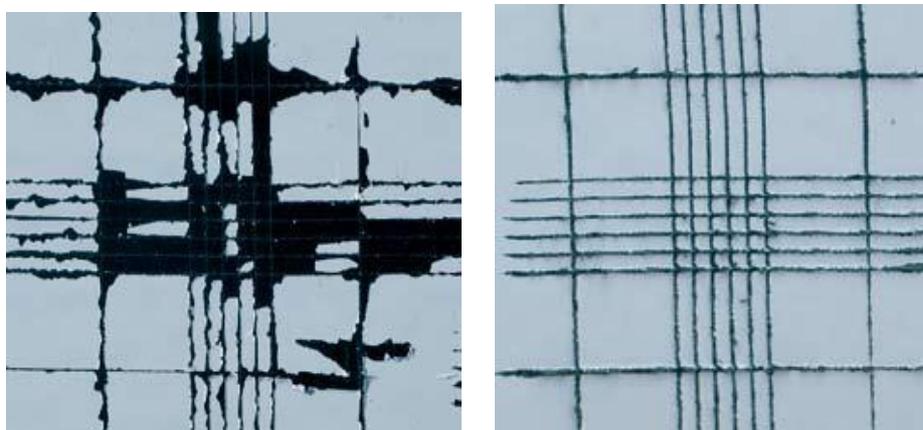


Figura 3-6. Superficie antes de la activación y después de ella.

Nuevamente, los plasmas que podemos utilizar son los del argón, el oxígeno y el hidrógeno. El plasma de argón (Ar) elimina continuamente los átomos de la superficie por impacto, quedando sensible y favoreciendo

la adhesión de pintura o pegamento. El plasma de oxígeno permite a los polímeros adquirir nuevas propiedades que favorecerán futuros procesos de fabricación mediante la inversión de su polaridad. El plasma de hidrógeno (H) por su parte reduce las capas de óxido superficiales formadas sobre aplicaciones electrónicas, ignorando las superficies metálicas. La activación con plasma se utiliza ampliamente en las industrias médica, automotriz, electrónica, de sensores, textil y de sistemas mecánicos y material de investigación científica.

3.2.2.3 Recubrimiento de superficies por plasma

El recubrimiento de superficies mediante el uso de plasma permite usarlo a otro nivel, creando capas ultrafinas de un recubrimiento sobre otro material (plástico, metal, vidrio, etc.) para mejorar la superficie y hacerla apta para otras aplicaciones, como por ejemplo hacer una superficie conductora mediante la adición de una capa de metal o bien transformar un material hidrófobo en hidrófilo o viceversa. También existe el concepto de plasmapolimerización para dar un nombre a esta técnica.

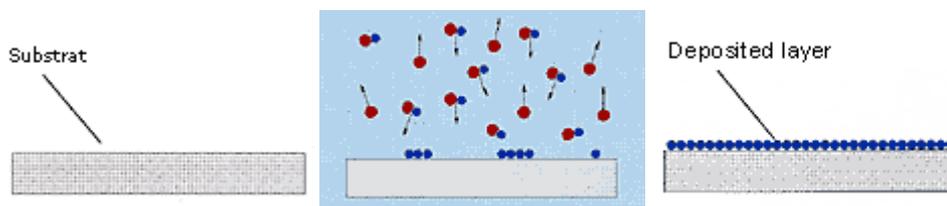


Figura 3-7. Ilustración del proceso de recubrimiento con plasma.

La plasmapolimerización requiere que el compuesto a aplicar sobre el material con el que se trabaja se introduzca en la cámara junto al gas que formará el plasma y se depositarán capas de ese compuesto en la superficie del sustrato. El recubrimiento tarda unos minutos en completarse, y la capa es tan fina que no modifica el aspecto del sustrato. Durante la técnica la sustancia es pulverizada dentro de la cámara mediante un “gas portador”. La sustancia mantiene su estructura y es adherida al sustrato mediante uniones físicas producidas por las fuerzas de atracción y las fuerzas intermoleculares de Van der Waals. No obstante, algunas de las propiedades del sustrato pueden alterarse por la sustancia del recubrimiento. Estas propiedades nuevas para el material no dependen únicamente del tipo de sustancia empleada, también se ven condicionadas a los parámetros usados para el proceso (presión del gas, temperatura, etc).

Podemos determinar si el recubrimiento mediante plasmapolimerización puede ser exitoso o no si el recubrimiento mantiene retenida la estructura original del sustrato, aunque no es un método preciso.



Figura 3-8. Podemos apreciar en las imágenes, respectivamente, una superficie de algodón sobre la cual se aplica el líquido con colorante azul, una superficie donde se aplica un recubrimiento hidrófilico y otra en la cual se aplica un recubrimiento hidrófóbico.

Estos recubrimientos pueden realizarse con una infinidad de sustancias dependiendo del propósito de la aplicación. También es posible crear diferentes capas funcionales en montajes que pretendan, por ejemplo, utilizar fluidos y microválvulas. También podemos crear protecciones para componentes mediante la deposición de capas de carbono a alta presión, generando capas con las propiedades fisicoquímicas del diamante. Como se ve en la figura 3-8, la industria textil puede usar este proceso, así como otras industrias como la médica donde la protección y la biocompatibilidad de los componentes sean características cruciales.

3.2.2.4 Etching (Rascado) de superficies por plasma

La superficie es erosionada con un gas plasmágeno químicamente reactivo, logrando potenciar la estructura superficial a nivel microscópico. Con este proceso se retira parte del sustrato superficial siguiendo un patrón preestablecido. También es denominado RIE (Reactive Ion Etching), grabado iónico reactivo. El ataque químico se utiliza antes de pintar, pegar o imprimir y es especialmente útil en la fabricación de materiales como el POM y el PTFE, materiales necesarios para tratar los sustratos.

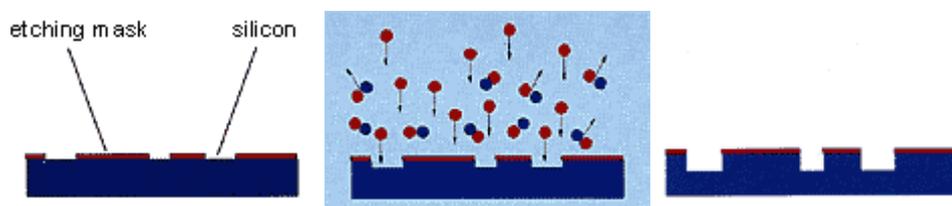


Figura 3-9. Ilustración del proceso de etching con plasma.

Este proceso funciona cubriendo una parte del sustrato con un material resistente al plasma, dejando una parte expuesta a él para que sea eliminada. Las partes expuestas al plasma serán determinadas por una máscara. Se introduce en la máscara un gas químicamente activo y se dirige hacia el sustrato un gran flujo de iones reactivos de alta energía con el que se graba o erosiona la superficie en las partes no enmascaradas. El material retirado pasa a forma gaseosa y es expulsado por el sistema de vacío, de forma similar a como ocurre en el proceso de limpieza mediante plasma.

3. Pegado del PDMS mediante plasma de oxígeno

Se han publicado numerosas técnicas de pegado del polidimetilsiloxano durante los últimos años debidos a que las utilidades de los dispositivos multicapa PDMS se han incrementado. El pegado mediante plasma de oxígeno a pesar de su coste, tiempo adicional de fabricación y resultados inconsistentes en el pegado, ha permanecido como un método ampliamente usado para el pegado de capas de PDMS.

Un gran número de factores intervienen en la calidad del pegado, incluyendo el tipo de técnica usada, la limpieza de las superficies de la unión, la proporción entre el PDMS base y el agente de curado y la duración del proceso de horneado o curado. En muchos casos la aplicación y la complejidad del diseño deciden que técnica de pegado es requerida para cumplir las especificaciones del diseño, o lo que es lo mismo, no todas las técnicas son válidas para todas las aplicaciones. Algunas técnicas de pegado alteran la superficie del material químicamente para mediante microcanales, las cuales pueden resultar tanto beneficiosas como problemáticas en utilidades biomédicas. Aplicaciones que utilicen gases a alta presión podrían requerir una fuerza elevada de unión para mantener la integridad del dispositivo, mientras que otras aplicaciones que podrían implementar microválvulas que dependen de una fuerza de unión algo más baja para ayudar a sellar esos microcanales. En aplicaciones que utilicen microbombas se requieren expansiones de PDMS para poder doblar las capas pero causan problemas en la precisión de la medida de volúmenes de las muestras.

Hay numerosas técnicas para el pegado del PDMS y cada una de ellas presenta ventajas e inconvenientes. Una de las primeras técnicas conocidas fue la adhesión mediante el contacto de dos capas completamente curadas de PDMS que conforman un pegado fácilmente reversible. Se usa una oxidación en la superficie para incrementar la fuerza de la unión activando las capas de PDMS con plasma de oxígeno. Esta oxidación pretende exponer los grupos de silanol (OH) en la superficie de las capas de PDMS que unidas forman enlaces covalentes de siloxano (Si-O-Si). Este acercamiento hace a los canales más hidrófilos, permitiendo una mejor calidad en cuanto a llenado con fluidos durante un periodo de tiempo tras el tratamiento con plasma de oxígeno. No obstante, las superficies vuelven a su estado hidrófobo rápidamente tras volver a la exposición ante la atmósfera.

La exposición a plasma de oxígeno añade la gran ventaja de poder adherir el PDMS a otros materiales como el vidrio. Los inconvenientes asociados al plasma de oxígeno también afectan al proceso, como la necesidad de un ambiente limpio de trabajo donde desarrollar el pegado y la superficie de contacto de las capas a unir. El plasma de oxígeno añade un coste significativo al proceso de fabricación mientras que limita la flexibilidad con los sustratos debido a los requerimientos de limpieza y las restricciones de tamaño de las cámaras. Existe una técnica de pegado consistente en una capa pegajosa de PDMS con menor cantidad de agente curante que se combinaría con una con mayor cantidad. Este método fue implementado en dispositivos multicapa para microfluidos que contuvieran actuadores mediante bombas neumáticas. Este enfoque permite al dispositivo una unión más limpia, ya que reduce el riesgo de aparición de polvo y otros agentes contaminantes en las superficies de contacto.

Otros estudios utilizan una capa de agente curador como adhesivo para unir las superficies. La capa adhesiva se inserta en una capa de PDMS que contenga una fina capa de agente curante para más tarde unir la combinación a la otra capa de PDMS mediante el contacto. El montaje final se expone a luz ultravioleta o a un horno para su curado definitivo, quedando una unión sólida. Esta técnica es eficaz no sólo para pegar PDMS, sino para pegarlo a otros materiales. El curado parcial del PDMS también ha resultado un método eficaz y barato para crear servicios multicapa, juntando PDMS con una proporción 10:1 puesta en moldes y curado durante un periodo corto de tiempo a baja temperatura (entre 30-60 minutos a menos de 60 °C). Las capas de PDMS se endurecerán lo suficiente como para ser extraídas del molde pero no lo suficientemente enlazadas como para formar una unión fuerte, quedando a merced de una posterior unión con otra capa de PDMS que se haya creado de igual forma y completado el curado quedando el enlace de las capas eficazmente terminado. La descarga mediante efecto corona también ha demostrado poder implementarse para unir varias capas de PDMS completamente curadas, mediante la generación de un alto potencial eléctrico entre los electrodos, ionizando el aire formando el efecto corona que activará las superficies de las capas. El proceso puede realizarse a temperatura ambiente y a una presión normal sin necesidad de generar el vacío.

Mientras que esas técnicas de pegado han sido optimizadas y profundamente estudiadas, es difícil juzgar y comparar cada método en cuanto concierne a la fuerza del pegado. Las técnicas varían debido al coste, conveniencia y tiempo de ejecución, pero no hay una investigación que con certeza determine sus fuerzas de pegado relativas. Se han realizado estudios que buscaban optimizar la técnica del pegado mediante plasma de oxígeno y compararla objetivamente frente a otras técnicas mediante el cálculo de la fuerza de la unión. El estudio de los doctores Mark A. Eddings y Michael A. Johnson del departamento de bioingeniería de la universidad de Utah [7] comprobó la eficacia del método mediante el uso de aire comprimido de presión variable sobre muestras idénticas unidas mediante diferentes técnicas mencionadas.

Las muestras a unir se realizaron con la proporción 10:1 y se determinaron como condiciones óptimas una cámara de presión a 700 mTorr, 20 W de potencia y 30 segundos de exposición al plasma, obtenidas de estudios previos de la unión mediante plasma de oxígeno. Se usó una tensión de 15 kV para el método de pegado con descarga de efecto corona. Los parámetros de cada método de pegado se realizaron para mantener en la medida de lo posible las mismas características para muestras originadas bajo las mismas condiciones. En el entorno donde se realizaban las pruebas se usaba un conducto de aire comprimido a través de una entrada a la unión de las capas de PDMS como se muestra en la figura 3-10. Se aplicaba presión mediante incrementos de 35 kPa durante intervalos de 5 segundos hasta que se notaban irregularidades en la unión.

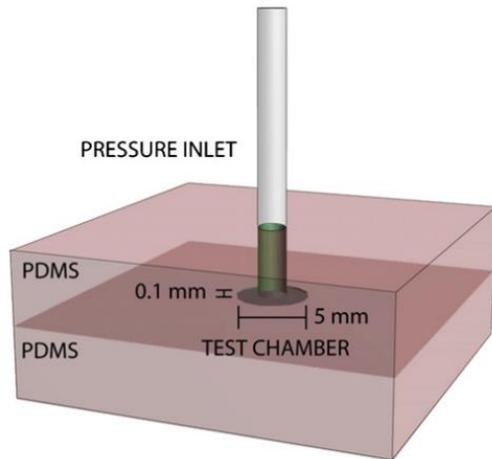


Figura 3-10. Prueba para medir la fuerza de pegado mediante uso de aire comprimido.

Este montaje presentaba poca tolerancia en cuando a fallos en el montaje. Se observaban dilataciones de las capas e incluso roturas en sus superficies. Para detectar que no existían pérdidas en la entrada del aire comprimido se utilizaba una solución de agua y jabón sobre el dispositivo para detectar la aparición de burbujas (fugas de aire) en la periferia de la superficie de PDMS.

Se muestra una comparación entre la eficacia de distintos métodos de pegado del PDMS en la figura X.X. En ella se utilizan las condiciones anteriormente mencionadas para la fabricación de la muestra y el plasma.

Los resultados coincidían con los de las publicaciones relacionadas obteniendo fuerzas de unión que eran cercanas a los 300 kPa. Hay variaciones notables entre diferentes técnicas y muestras. La fuerza oscilaba entre los 180 y 715 kPa. Estas variaciones no solo se atribuyen al proceso, sino a la limpieza y calidad del entorno de trabajo.

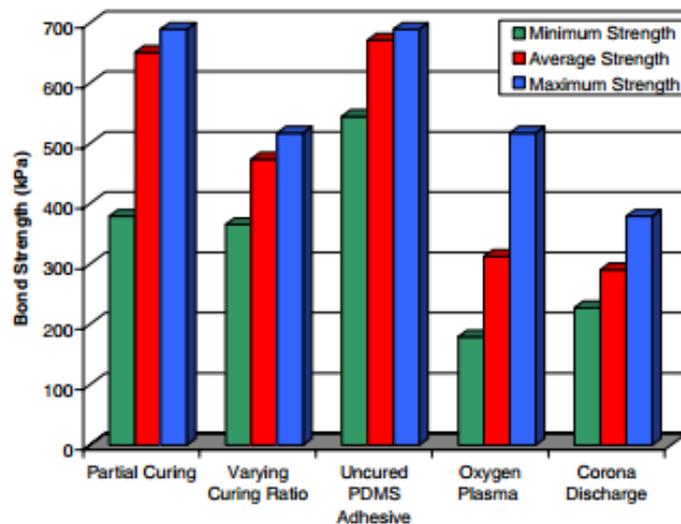


Figura 3-11. Gráfica de comparación entre diferentes técnicas de pegado del PDMS. De izquierda a derecha: curado parcial, variación de la proporción de agente curante, adhesivo de PDMS no curado, plasma de oxígeno y descarga de corona.

Se observó que la descarga de corona se comportaba de forma similar a la técnica de plasma por la facilidad para unir rápidamente las superficies donde se aplicaron. La diferencia entre ambas técnicas reside en que el tratamiento con plasma de oxígeno produce una activación más consistente e uniforme, aunque el tiempo que demoran las superficies activadas con plasma es considerablemente mayor desde que sale del entorno de vacío y es expuesto a condiciones atmosféricas. La fuerza de unión media del proceso eran 290 kPa mientras que los mínimos y máximos fueron 227 y 380 kPa respectivamente. El método de unión mediante descarga de corona es mucho más ventajoso en el sentido económico pues no necesita de un entorno limpio y esto reduce considerablemente el coste y complejidad del proceso. También nos permite adherir el PDMS a otros

materiales, del mismo modo de que el plasma, y es útil para unir de forma sencilla varias capas de PDMS.

Las demás técnicas usaron una proporción 15:1 para estas comparaciones, sin entrar en muchos detalles, las que mejor resultados obtuvo fue la técnica de la capa adhesiva, con unas fuerzas de unión que oscilaban entre los 545 y los 690 kPa con el inconveniente de perder maniobrabilidad con el material. No obstante, el pegado mediante plasma de oxígeno bajo ciertas condiciones puede acercarse a estos valores bajo las condiciones adecuadas en su diseño y prueba manteniendo las propiedades que hacen del PDMS un material valioso para las tecnologías MEMS.

4 PRUEBAS Y RESULTADOS

Una vez se han consultado los artículos y se ha estudiado el proceso, se han llevado a cabo diferentes pruebas en la sala blanca del laboratorio. Este apartado servirá para describir tanto el laboratorio como las distintas pruebas que se han realizado para el desarrollo de este trabajo. El equipamiento y recursos utilizados dentro del laboratorio quedarán indicados y se detallarán las pruebas realizadas bajo diferentes condiciones de fabricación.

En primer lugar se describirán detalladamente todas las herramientas y equipos necesarios para realizar el pegado del PDMS sobre PDMS, así como los materiales utilizados para cada prueba. Tras esto, haremos un estudio exhaustivo de todas las técnicas empleadas para las pruebas e iremos analizando los resultados de todas y cada una de ellas. Finalmente, podremos ver el comportamiento que ha mostrado la eficacia del proceso prueba a prueba, hasta poder analizar cual ha sido el mejor resultado y cuales son las mejores condiciones para obtenerlo.

4.1. Fabricación del PDMS

El PDMS es un material que pese a sus propiedades inauditas se muestra rebelde a la hora de trabajar con él. La fabricación del PDMS por el contrario, es bastante sencilla, barata y requiere pocos recursos para realizarse. Las principales herramientas necesarias para su fabricación son:

- Prepolímero PDMS: En el formato comercial, el PDMS se vende en recipientes cerrados herméticamente que lo contienen en un estado no curado. En este estado es un líquido viscoso y ligero. Puede encontrarse en el mercado en diversos formatos, clasificados por peso o volumen, según el fabricante.
- Agente curador: Una sustancia química que al mezclarse con el prepolímero iniciará el proceso de curado del PDMS. Es un líquido que generalmente se vende junto al prepolímero en envases pequeños. Las cantidades de este líquido variarán según la fórmula de fabricación que elijamos.
- Horno: El proceso de curado del PDMS requiere una exposición a temperatura ambiente durante horas, pero se puede acelerar el proceso mediante el horneado de la mezcla durante una menor cantidad de tiempo.
- Molde prefabricado: Contendrá y dará la forma a la superficie del PDMS. Tras el curado el PDMS será extraído del molde con la forma deseada.
- Campana de vacío: Es importante una desgasificación de la mezcla del prepolímero y el agente curante para evitar que las burbujas de aire contenidas en la mezcla afecten a la aplicación y comprometan eficacia de la fabricación.
- Instrumental para trabajar el PDMS: Herramientas como placas de Petri, bisturíes, pinzas, varillas de vidrio, etc.

Una vez se han descrito las herramientas, la fabricación puede comenzar siguiendo una serie de fases con un orden determinado. Es importante no alterar el orden de las fases, pues el resultado sería no apto. En primer lugar, se introduce en un recipiente plástico y limpio las cantidades deseadas de prepolímero y agente curador. Existen reglas de diseño respecto a este paso, pues las cantidades de cada material afectarán a su estado. Podemos destacar tres proporciones: 1:10, 1:5 y 1:20. El significado de estas escalas es simple, si tenemos una proporción “a:b” usaremos una cantidad “a” de gramos de agente curante y “b” veces esa cantidad en gramos de prepolímero. Según las cantidades, el PDMS resultante tendrá diferentes propiedades. La mezcla 1:10 nos da un PDMS sólido, flexible y transparente, pero al aumentar la cantidad de prepolímero en la mezcla, aumentará su flexibilidad. También ocurrirá lo opuesto si empleamos una menor cantidad de prepolímero, como en la mezcla 1:5. Otro detalle en cuanto a la mezcla usada a tener en cuenta es el tiempo que tardará en curarse por completo, pues mientras mayor sea la cantidad de agente curante, menor será el tiempo que tarde en completarse el curado.

Una vez hayamos depositado las cantidades deseadas en el recipiente, mezclamos bien el compuesto de forma manual, hasta obtener una mezcla viscosa y burbujeante. Se recomienda realizar el “batido” del compuesto durante unos minutos mediante una varilla de vidrio limpia. Tras esto introducimos la mezcla en una campana de vacío durante entre treinta minutos y una hora (a -600 mbar) para desgasificarla. Es importante este paso porque de no eliminar las burbujas el PDMS las contendrá, y su resistencia y flexibilidad se verán alteradas, y podrían arruinar el montaje si utilizásemos algún componente. Podemos verter el PDMS una vez desgasificado en el molde o bien desgasificarlo ya dentro del molde, esto es irrelevante para el procedimiento, pues el resultado será igual. También podemos crear capas finas de PDMS sobre un material mediante spin-coating si la aplicación lo requiere. En este estado es cuando el fabricante puede trabajarlo en estado líquido de forma liberal, siempre y cuando lo haga en un entorno limpio que no contamine la mezcla.

Una vez preparado el montaje, se introduce el molde en un horno durante un tiempo adecuado y una temperatura fija que dependerán de la cantidad de PDMS que deseemos curar. Para 10 gramos de mezcla 1:10 bastarían 40 minutos a 65 °C. El exceso de tiempo fortalecerá la unión de los enlaces de los monómeros, pero nunca debe extraerse la estructura del horno antes del curado, pues obtendremos un curado no uniforme. Las cantidades de agente curador afectan también al tiempo de curado reduciendo considerablemente el tiempo necesario para curar.

Transcurrido el tiempo de horneado, el PDMS se solidifica por completo, quedando listo para su extracción del molde y manipulación. En este estado conviene dejarlo enfriar unos minutos, pues la adherencia a la estructura aún es fuerte y su separación podría deformar las paredes del PDMS.

4.2. Descripción de equipos y herramientas

El proceso de fabricación del PDMS es bastante sencillo en comparación al de otros materiales, y su pegado mediante plasma de oxígeno no es menos sencillo. Los equipos, instrumentos y materiales utilizados quedarán recogidos en este apartado, hallándose todos en la sala blanca del laboratorio del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

4.2.1. PDMS Utilizado

Para la realización de las pruebas se ha utilizado el kit de PDMS Sylgard 184, kit de elastómero de silicona. El departamento de Ingeniería Electrónica cuenta con dos kits que contienen tanto el polímero base como el agente curante en dos envases, uno considerablemente mayor que el otro. Es un producto muy usado para aplicaciones con dispositivos electrónicos. El precio del kit puede variar según el vendedor, y los precios en Internet oscilan entre los 70 y los 100 dólares estadounidenses. Todas las pruebas se han realizado con la mezcla 10:1. Los detalles del producto pueden ser consultados en el anexo I de este trabajo.

4.2.2. Generador de plasma Zepto 114458

Este trabajo y las pruebas que corroboran la veracidad del proceso de adhesión del PDMS necesita un equipo especial para poder generar y utilizar el plasma, y el laboratorio dispone del equipo Zepto 114458 para tecnologías de plasma en superficie de Diener Electronics. Esta máquina dispone de una cámara interna de vacío con forma cilíndrica con un diámetro de aproximadamente 10.5 cms y 30 centímetros de longitud, con un volumen total de 2,6 litros. Dispone de dos entradas de gas y dos canales para la inserción del gas en la cámara. La máquina principal posee una fuente de alimentación conectada a la red eléctrica y un ventilador para autorefrigerarse, y está conectada a una bomba de vacío.



Figura 4-1. Equipo Zepto 114458

La cabina de la máquina posee tres indicadores de presión. Uno de ellos, ubicado en la parte superior derecha indica la presión en milibares del interior de la cámara, y otros dos de ellos, son idénticos e indican la presión de los gases que introducimos en ella. También posee actuadores para varios propósitos: Un botón para encender y apagar la máquina, manivelas para configurar el temporizador y el generador de alta frecuencia, dos válvulas para manipular la presión de los gases que introducimos por los canales, y botones para activar y desactivar la bomba de vacío, para comenzar y terminar de aplicar plasma, y para encender y apagar la ventilación.

La entrada a la cámara interna se sella al hacer el vacío, y se puede ver el interior a través de una tapadera de vidrio de amplio grosor. La bomba de vacío utiliza un aceite específico para funcionar. La máquina tiene un protocolo de funcionamiento. Primero debe realizarse el vacío para expulsar las impurezas de la cámara, y comienza a descomprimirse su interior. Tras la descompresión (al indicar unos 0.2 mbar) podemos pulsar el botón “generador” y podremos ver el plasma en el interior de la cámara. Una vez terminamos el tiempo de aplicación del plasma, debe apagarse y ventilarse, entonces la entrada a la cámara se abrirá. Para nuestras pruebas el aire introducido en la cámara era aire extraído del exterior a temperatura ambiente, con presión variable gracias a la máquina. Este aire es rico en oxígeno, y las sustancias no deseadas son extraídas hacia el exterior por la bomba de forma similar a como ocurre con los procesos de limpieza mediante plasma. Idealmente, el plasma de oxígeno puro sería el mejor aire a crear para aplicarlo a polímeros.

4.3. Montajes y primeras pruebas

Todas las pruebas se han realizado en dos fases: una de fabricación de las muestras y otra de estudio de su fuerza de pegado. En primer lugar, se prepara un trozo de placa rectangular PCB sobre un soporte de papel de aluminio para mantener posteriormente el PDMS no curado en estado líquido para evitar que se derrame. Es imperativo comprobar que esto se ha hecho correctamente pues cualquier fuga podría causar un fracaso en el experimento. Una vez se ha decidido la proporción de PDMS y agente curante y se han mezclado las dos sustancias, podemos verterlo de forma previa o posterior al desgasificado, ya sea desgasificando la mezcla en su recipiente o bien ya vertida en el molde. Tras esto pasaremos a la fase de horneado, se cortarán trozos de PDMS de forma cuadrada o rectangular y se les aplicará el tratamiento con plasma. Tras la aplicación de la técnica, se procede al pegado de las superficies que recibieron el plasma, quedando completo el pegado.

La segunda fase consistirá estudiar el comportamiento del pegado y hallar un método viable para medir la fuerza del pegado. Al igual que en algunos estudios previos realizados, se ha optado por implementar una entrada de aire comprimido de presión variable en una de las dos caras de PDMS pegadas para introducir el aire comprimido, e iremos variando la presión y observando los cambios en la muestra, las deformaciones sufridas y la presión a la que se despegó. Para este fin hemos utilizado tubos de plástico adheridos mediante un adhesivo de doble cara a la superficie plana del molde que, al verter el PDMS líquido, dejan la parte pegada al PCB cubierta de PDMS. Antes del pegado mediante plasma, se extrae el adhesivo para permitir el paso del aire a través del tubo.

4.3.1. Primer montaje: Tubos de plástico revestido

Se han probado diferentes montajes a lo largo del desarrollo de las pruebas para el sistema de aire comprimido. Las técnicas iniciales utilizaban trozos de tubo de plástico con distintos diámetros para reforzar el pegado del PDMS al tubo de plástico. Estos montajes pretendían ser una buena solución para esta tarea, pero sin embargo generaban fallos durante las pruebas, al ser mas fuerte el pegado del PDMS al PDMS producido por el plasma que la unión entre el PDMS con la entrada del aire. En consecuencia, varias de las pruebas realizadas fueron fallidas al separarse el tubo de aire del PDMS, a partir de ciertos niveles de presión.

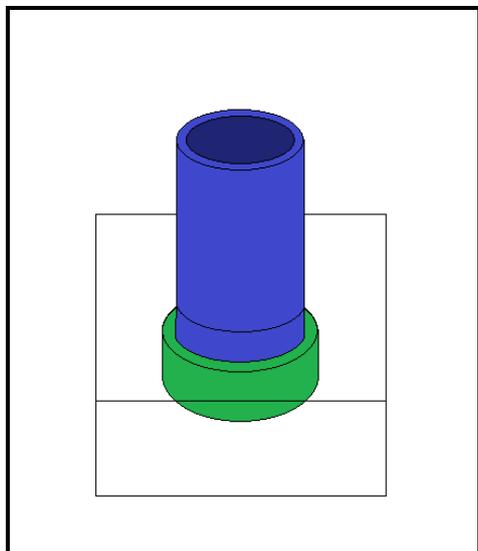


Figura 4-2. Montaje mediante tubos de plástico revestido. Se puede apreciar como el PDMS transparente permite ver la unión de los dos tubos de distintos diámetros.

Esta aproximación sirvió de guía a todas las pruebas que se realizaron en el laboratorio, pues era una solución sencilla, fácil de realizar y repetible. La condición principal era que el PDMS no curado cubriera la porción de tubo verde, quedando sellada la unión del verde con el azul. Una vez se hornearon las muestras y se cortaron, el PDMS ya sólido había asimilado bien los tubos, creando una unión relativamente sólida.

Para la manipulación del fragmento de PDMS que se hallaba pegado al tubo era necesario tomar precauciones extremas y no aplicar ninguna fuerza sobre la unión del tubo con el PDMS. De este modo se pretende evitar la separación de ambos elementos. Un tubo flexible del diámetro adecuado sería conectado a las entradas y a través de él el aire comprimido circulaba por el tubo azul hasta la zona donde se unían los dos trozos de PDMS pegados mediante plasma.

Se realizaron un total de cuatro pruebas con este montaje, creando dos muestras de PDMS pegados en cada prueba. Se ha mantenido esta política de crear las muestras en pares para añadir algo de redundancia en la verificación, y tener mejores referencias en caso de que alguna saliera defectuosa. Esto se ha hecho así para todas las pruebas realizadas en todo el trabajo.

Tabla 4-1. Parámetros y resultados obtenidos durante las pruebas realizadas con el montaje 1..

Prueba	Presión de gas (mbar)	T. Plasma (s)	Presión ruptura (mbar)	Estado final	Observaciones
1	1.5	40	~700	Fallida	Separado de entrada de aire.
1	1.5	40	814	Éxito	Pegadas y separadas correctamente.
2	1.5	50	961	Éxito	Pegadas y separadas correctamente.
2	1.5	60	891	Éxito	Pegadas y separadas correctamente.
3	1.5	40	~680	Fallida	Separado de entrada de aire.
3	1.5	60	~920	Fallida	Separado de entrada de aire.
4	1.5	45	~860	Fallida	Separado de entrada de aire.
4	1.5	55	1012	Éxito	Pegadas y separadas correctamente.

En la tabla x.x se pueden apreciar los resultados de las pruebas y las condiciones de fabricación con las que se llevaron a cabo. Estas pruebas no dieron resultados deseables debido a los fallos accidentales por la separación de la entrada de aire, que en dos de las pruebas hicieron salir disparado el PDMS al elevar la presión. Sin embargo aunque la técnica no era del todo fiable, nos hizo ver que la fuerza del pegado era considerablemente mayor en las pruebas exitosas que se realizaron exponiendo el PDMS al plasma durante un periodo aproximado a los 50 segundos.

4.3.2. Segundo montaje: Junta de unión mediante tubos

El primer montaje quedó completamente descartado al ver que la unión de los tubos con el PDMS era quebradiza si no estaban completamente fijos. De modo que la primera idea para solventar esta situación era el uso de algún tipo de mecanismo o estructura que mantuviese fija esa unión. El segundo montaje se inspiró en una pieza de un artilugio usado para colgar cuadros en paredes, que contenía un pequeño tubo que disponía de mayor diámetro en las secciones de sus bordes que en el resto de su forma cilíndrica. Se improvisó una nueva estructura con tubos que emulara este artilugio, quedando el tubo “anclado” en el PDMS fortaleciendo la unión por dos secciones. La idea era simple, pero efectiva, ya que las pruebas dieron resultados mucho mejores que con el primer montaje.

La nueva estructura contaba con los mismos tubos azul y verde, solo que en este caso se usaron dos tubos verdes de igual diámetro y longitud sobre el tubo azul dejando un espacio de tubo azul entre ellos, tal como se muestra en la figura 4-3. Este sistema fue eficaz para anclar el PDMS, pero tampoco resultó ser la técnica óptima, pues al contar con tres tubos diferentes con diferentes diámetros (el del tubo azul y el del verde) era difícil manejar las muestras sin mover alguno de los tubos una vez se solidificaba el PDMS.

Al manejar con cuidado extremo las muestras que contenían los tubos, y al pegarlas, el resultado era aceptable, y las medidas obtenidas en la fuerza de la unión eran mucho mejores que las obtenidas con el primer montaje. Tras descubrir esto en las dos primeras pruebas se dejó de comparar resultados con los obtenidos con el tubo de plástico revestido, pues ya podíamos maniobrar con información más fiable y exacta, y observar cambios notables en las muestras durante el proceso de medición.

Algunas de las anomalías apreciables sobre el PDMS era la creación de una burbuja de aire entre las dos porciones de PDMS pegadas, que se expandía hasta llegar a una de las paredes, completando el despegado. Este despegado no era uniforme, ya que la burbuja tiene a expandirse hacia una pared, pero no por toda la superficie de PDMS. Los resultados finales en cuando a fuerza mostraban una mejoría notable, llegando en algunos casos a superar el bar de presión.

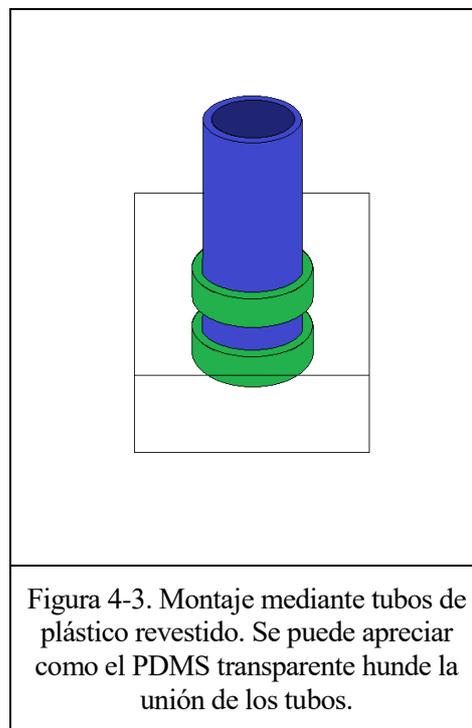


Tabla 4-2. Parámetros y resultados obtenidos durante las pruebas realizadas con el montaje 2..

Prueba	Presión de gas (mbar)	T. Plasma (s)	Presión ruptura (mbar)	Estado final	Observaciones
1	1.5	50	1319	Éxito	Pegadas y separadas correctamente.
1	1.5	45	~860	Fallida	Se mueven los tubos verdes.
2	1.5	50	~961	Fallida	Separado de entrada de aire.
2	1.5	50	1433	Éxito	Pegadas y separadas correctamente.
3	1.5	45	960	Éxito	Pegadas y separadas correctamente.
3	1.5	55	1624	Éxito	Pegadas y separadas correctamente.
4	1.5	45	~1200	Fallida	Separado de entrada de aire.
4	1.5	55	1462	Éxito	Pegadas y separadas correctamente.

Durante la medición se pudo observar que la posición relativa de los tubos verdes podía cambiar durante la manipulación de las partes de PDMS a pegar que los contenían. Además, para usar este montaje era necesaria una cantidad de PDMS lo suficientemente grande como para que las capas llegasen al espacio de tubo azul y lo cubriesen, ya que de lo contrario el sistema bajo pruebas sería el mismo montaje 1. En cuanto a los resultados obtenidos, eran mucho mejores, y se obtuvieron un total de cinco casos de éxito de un total de 8 muestras, en cuatro pruebas diferentes al igual que en la remesa anterior.

Tras analizarlos, podemos comprobar que realmente se consiguió medir una mayor fuerza de pegado, probablemente debido a que el montaje favorece la entrada del aire comprimido en la muestra, sin comprometer la estructura demasiado. También se pudo demostrar mediante estos ensayos que las muestras que usaron un tiempo de plasma de 55 segundos presentan una mayor adherencia que las que emplean un tiempo menor. Desde esta perspectiva, podemos determinar que el tiempo de aplicación del plasma sobre el PDMS está implícitamente vinculado al pegado, cosa que se debe a que un número mayor de moléculas de la superficie se están desintegrando y recombinando durante el pegado. La técnica daba resultados apreciables y medibles, pero de nuevo estaba presente el problema de la unión entre los tubos y el PDMS. Era necesario un sistema fiable y repetible que permitiera el despegue y no causara más muestras defectuosas.

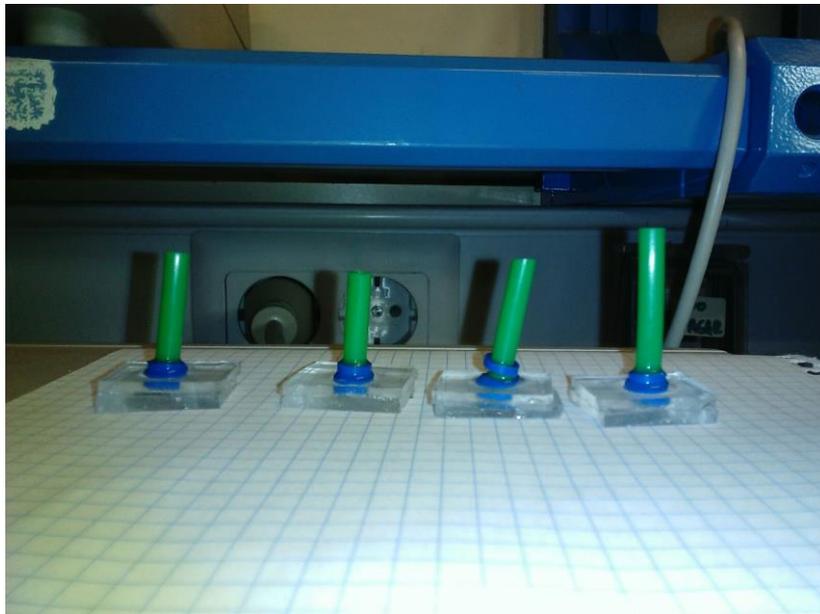


Figura 4-4. Colección de muestras realizadas con el montaje 2.

4.3.3. Tercer montaje: Junta mediante tubos con refuerzo de silicona



Figura 4-5. Muestras recién fabricadas empleando el montaje 3 antes de aplicar la silicona.

Tras las pruebas con los otros montajes el problema presente era siempre el mismo: la unión del tubo de la entrada del aire comprimido era débil. El intento de usar algún pequeño dispositivo como ancla era una buena solución y no se quería descartar sin antes probar la fuerza de pegado de alguna forma. Para evitar pérdidas de aire y la separación de la entrada de presión del PDMS se utilizó un adhesivo de silicona para taponar la unión. Este adhesivo se solifica a temperatura ambiente durante unas horas, dejando un resultado aceptable.

El PDMS toleraba bien el adhesivo, pues ambos materiales tienen propiedades similares. En este proceso se realizaron tres pruebas con dos muestras cada uno, y se obtuvieron resultados similares al segundo montaje en cuanto a la fuerza del pegado, aunque una mejoría considerable en cuanto a la cantidad de muestras fallidas ya que no hubo ningún fracaso. Para comprobar la presión de ruptura adecuada se fueron aplicando variaciones de unos 100 mbar de presión durante intervalos de 5 segundos. Las presiones de ruptura fueron aquellas donde la burbuja de aire formada en la unión entre ambas superficies de PDMS perdió su estabilidad y dejó escapar el aire por algún lateral.

Tabla 4-3. Parámetros y resultados obtenidos durante las pruebas realizadas con el montaje 3.

Prueba	Presión de gas (mbar)	T. Plasma (s)	Presión ruptura (mbar)	Estado final	Observaciones
1	1.5	50	1541	Éxito	Pegadas y separadas correctamente.
1	1.5	50	1409	Éxito	Pegadas y separadas correctamente.
2	1.5	50	1593	Éxito	Pegadas y separadas correctamente.
2	1.5	50	1433	Éxito	Pegadas y separadas correctamente.
3	1.5	60	1162	Éxito	Pegadas y separadas correctamente.
3	1.5	60	1289	Éxito	Pegadas y separadas correctamente.

Este método ofrecía una medida fiable en cuanto a la fuerza del pegado, pero añadía a la masa de la pieza superior (la que contiene la entrada del tubo) la masa de la silicona, aumentando el peso de esta pieza sobre el montaje. Este peso contribuye indirectamente a la fuerza del pegado, ya que aumenta la masa total de la muestra. Pese a la eficacia del método y a los resultados, esta técnica fue descartada al depender de materiales

externos al experimento y retrasar la fabricación a causa de la aplicación y secado del pegamento.

4.3.4. Montaje final: Pieza especial para el anclado

Al pensar en una forma eficaz de mantener una unión firme del PDMS a la entrada de aire comprimido se investigó una nueva forma de utilizar un “ancla” que mantuviese una unión firme al ser cubierta por el PDMS ya curado. Este montaje utilizó la base de una jeringuilla médica que tenía una forma muy particular. Estaba compuesta por un tubo de pocos milímetros de diámetro sobre una base plana con la que se une mediante una curva. Este objeto permite cubrirlo de PDMS hasta cierta altura, quedando bien “anclada” la pieza de plástico en el interior del PDMS. La masa del objeto era menor al medio gramo, por lo que se puede despreciar en comparación con la masa total de la muestra ya que bastan pocos milibares para levantar esa masa. Para evitar que el PDMS líquido penetrase el tubo taponándolo, se utilizó un pequeño cono de plástico flexible, cuyo interior permite el paso del aire a través de él, con una base que encaja con el diámetro interior de la pieza anterior. Este cono nos dará cierta altura y permitirá que entre solo la parte de PDMS necesaria para un anclado fuerte. Podemos ver en la figura 4-6 un ejemplo de una muestra.

Esta técnica posee todo lo que buscábamos para garantizar la fiabilidad de la media: una unión fuerte del PDMS con la entrada, una buena área de PDMS pegado, un proceso de fabricación sencillo y repetible, ninguna necesidad de aplicar otros productos, y la posibilidad de apreciar mejor las burbujas de aire internas.

Los resultados obtenidos permitieron mejorar el sistema de medición, pudiendo observar el comportamiento del pegado con la variación de otros parámetros distintos al tiempo de exposición al plasma. Los resultados obtenidos hicieron de esta técnica el candidato ganador para realizar la caracterización del proceso de pegado.



Figura 4-6. Muestra con el montaje final, vista en planta y perfil.

Inicialmente se realizó una prueba con el objetivo único de ver su eficacia, pues el montaje 3 ya parecía ser un buen método para medir la fuerza del pegado, pero los resultados con esta pieza fueron decisivos para la correcta caracterización de los parámetros para conseguir una unión óptima mediante el plasma. Se realizó una prueba con dos muestras en la cual variamos el tiempo de exposición al plasma de cada una de ellas.

La masa total de mezcla de PDMS con agente curante era de 13.2 gramos utilizando la proporción 10:1 para la mezcla. La primera muestra estuvo expuesta durante 40 segundos, y la segunda durante 50. Al aplicar presión, el despegue se produjo a los 1958 y los 2023 milibares, respectivamente para cada muestra. Estos resultados habían sido los mejores en todas las pruebas realizadas hasta ese momento, y desde entonces este montaje ha sido el elegido para la obtención fiable de los resultados.

4.4. Pruebas finales y resultados

Una vez se descubrió una técnica que nos permitía obtener resultados fiables y sin problemas secundarios al realizar la medición. La unión del PDMS a la entrada de aire era buena y ya no se quebraba con las altas presiones. A partir de una presión elevada, se aprecia una burbuja que crecerá de forma directamente proporcional a la presión del aire introducido. El PDMS queda despegado cuando el radio de la burbuja llega a uno de los extremos de la muestra. Para comprobar la existencia de fugas se sumergieron en agua limpia los trozos de PDMS, detectando la posible aparición de burbujas. No se detectaron burbujas debidas a fugas en la muestra, sino que en algunos casos provenían de la propia fuente de aire a presión. Para solventar esto en los casos en los que ocurría se utilizaron abrazaderas especiales de laboratorio para fortalecer la unión entre la entrada de aire y el tubo que lo conecta a la bomba de presión.



Figura 4-7. La unión entre la entrada de aire y la bomba de aire a presión debió ser fortalecida en algunos casos para evitar su separación.

Una vez la técnica fue designada como la mejor para la toma de resultados, se comenzaron a realizar nuevas pruebas en las cuales se han ido variando los diferentes parámetros que intervienen en el proceso de pegado: área de PDMS pegada, tiempo de exposición al plasma, presión del gas del plasma y masa de las muestras. Como se veía en los experimentos anteriormente realizados con los montajes descartados, el PDMS tenía una tendencia a pegarse mejor durante tiempos de aplicación del plasma cercanos a los 50 segundos. De modo que las primeras pruebas se realizaron para verificar este comportamiento. Se ha mantenido una potencia programada de 30 W para todas las pruebas.

Tabla 4-4. Parámetros y resultados obtenidos durante las pruebas realizadas con el montaje final..

Prueba	Presión de gas (mbar)	T. Plasma (s)	Masa PDMS (g)	Diámetro burbuja (mm)	Presión burbuja (mbar)	Presión ruptura (mbar)	Estado final
1	1.5	40	5.21	6.5	1821	1958	Éxito
1	1.5	50	4.89	5.9	1856	2023	Éxito
2	1.0	45	4.76	5.5	1649	1996	Éxito
2	1.8	55	4.67	6.7	1963	2219	Éxito

Con esta técnica los resultados son cercanos a los 2 bares de presión sin encontrar pérdidas. Queda demostrado por medio de ensayo y error y por estas pruebas que el tiempo de exposición adecuado oscila entre los 45 y los 55 segundos, tiempo suficiente para que el plasma active la superficie total de los fragmentos de PDMS sin penetrar en las moléculas internas haciéndolo perder sus propiedades. Las siguientes pruebas mantuvieron el tiempo de exposición en 50 segundos, pero fueron variando la masa total de PDMS a pegar por muestra. Se obtenían muestras más grandes de PDMS y se dejaron curar por completo para que el enfriamiento del PDMS no favoreciera al pegado. Se realizaron dos pruebas que emplearon una masa de 15 y 18 gramos de polímero PDMS en proporción 10:1.

Tabla 4-5. Parámetros y resultados obtenidos durante las pruebas realizadas con el montaje final con variaciones de la masa..

Prueba	Presión de gas (mbar)	T. Plasma (s)	Masa PDMS (g)	Diámetro burbuja (mm)	Presión burbuja (mbar)	Presión ruptura (mbar)	Estado final
3	1.5	50	6.81	7.2	2193	2314	Éxito
3	1.5	50	6.14	8.3	2065	2289	Éxito
4	1.5	50	7.96	13.6	2350	2589	Éxito
4	1.5	50	7.39	12.5	2214	2461	Éxito

La cantidad de masa del PDMS fabricado indica la cantidad de mezcla total de polímero se utilizó en proporción de 10:1 con el agente curador, teniendo cada muestra aproximadamente la mitad de la masa una vez curada (a excepción de irregularidades por el PDMS desechado durante el corte de las muestras y la no uniformidad del grosor en las muestras). La presión a la que aparecen las burbujas es elevada, así como la presión a la que se despegan los trozos de PDMS unidos, lo que resulta algo obvio ya que al ser una masa mayor, la fuerza necesaria para separar los fragmentos será también mayor. Cabe destacar que en estas muestras el radio de la burbuja que aparece por primera vez es considerablemente mayor que al alterar otras magnitudes. Se deduce de esto que el centro de la muestra presenta una mayor fuerza de presión, y al ceder este punto el pegado presenta menor resistencia al aire de forma radial. No obstante, hubo que aumentar la presión unas dos centenas de milibares para conseguir despegarlo por completo.

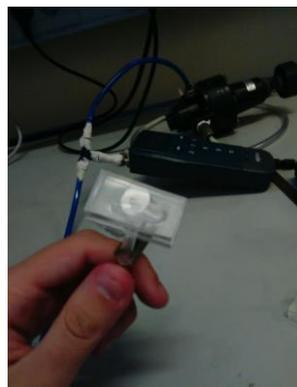


Figura 4-8. La burbuja adquiere forma circular, aunque no siempre se extiende radialmente toda la muestra.

Para corroborar la tan extendida afirmación de que los tratamientos con plasma son repetibles para una misma muestra, se separaron dos superficies y se volvieron a unir. Un tiempo de 30 segundos de exposición al plasma no logran el pegado del PDMS, pero uno de 50 segundos lo logró. Pudimos demostrar que el procedimiento se puede repetir para muestras completamente curadas y no pegadas, siempre y cuando se haya realizado un proceso de limpieza de ambas superficies.

La siguiente prueba utilizó 12 gramos de polímero PDMS para fabricar las muestras. Esta vez se pretendía descubrir el papel de la presión del gas con el que se genera el plasma en la eficacia del pegado de las muestras. Inicialmente fue un parámetro que poco se varió en algunos casos, ya que en otros estudios desarrollados por otras investigaciones recomendaban 1.5 milibares de presión, y fueron tomados como referencia. Las pruebas realizadas, junto a la prueba 2 con este montaje, son testimonio de la influencia de esta presión en el pegado.

Tabla 4-6. Parámetros y resultados obtenidos durante las pruebas realizadas con el montaje final con variaciones de la presión del gas introducido para generar el plasma..

Prueba	Presión de gas (mbar)	T. Plasma (s)	Masa PDMS (g)	Presión ruptura (mbar)	Estado final
2	1.0	45	5.01	1996	Éxito
2	1.8	55	5.41	2219	Éxito
5	0.8	50	4.96	1819	Éxito
5	1.0	50	5.14	2053	Éxito
6	1.6	50	5.56	2412	Éxito
6	1.9	50	4.32	2192	Éxito

Como se muestra en la tabla x.x, no se aprecia demasiada diferencia en algunos casos entre las presiones de ruptura de la unión. Se puede ver cierta reducción de la presión de ruptura en las muestras pegadas mediante una presión menor, así como una leve reducción en aquellas que emplearon 1.8 y 1.9 milibares. Se puede establecer que la presión del gas con el que se genera el plasma obtiene un mejor pegado a medida que se acerca al rango de entre los 1.5 y 1.6 milibares, pero esta presión no afecta al hecho de que se peguen. El parámetro, al contrario que el tiempo de exposición, no determina si las dos piezas de PDMS se pegan o no.

Tras haber estudiado todas estas variables y como afectan al resultado final, se han realizado unas últimas pruebas con el propósito de comprobar si las conjeturas que se han expuesto son correctas, para cada magnitud. Se ha establecido que el mejor pegado se produce bajo plasma de un gas a una presión de 1.5 milibares, por lo que se ha utilizado dicha cantidad. El tiempo de exposición al plasma será establecido a 50 segundos, ya que es el punto intermedio entre 45 y 55. Esa cantidad de tiempo debería ser adecuada para activar las superficies sin hacerlas mutar. Por último, la masa de la mezcla total ha sido 15 gramos. Con estos criterios establecidos, podemos predecir que la presión necesaria para despegar será superior a los 2100 milibares.

Tabla 4-7. Parámetros y resultados obtenidos durante las pruebas finales donde se puede apreciar que se han obtenido los resultados esperados.

Prueba	Presión de gas (mbar)	T. Plasma (s)	Masa PDMS (g)	Diámetro burbuja (mm)	Presión burbuja (mbar)	Presión ruptura (mbar)	Estado final
7	1.5	50	6.66	8.9	2023	2109	Éxito
7	1.5	50	6.32	8.7	2167	2331	Éxito
8	1.5	50	6.77	11.2	2334	2475	Éxito
8	1.5	50	6.89	10.1	2279	2362	Éxito

Se puede verificar que nuestra predicción era correcta, pues las cuatro muestras cumplen lo que se dedujo. Podemos establecer que la calidad del pegado es directamente proporcional a la masa de las muestras, que la presión del gas plasmático no afecta en gran medida al pegado, y que el tiempo de exposición al plasma será cercano a los 50 segundos. Por último, es necesario mencionar que un último parámetro existente durante todo el proceso que puede ser manipulado es la potencia con la que se genera el plasma, y se ha mantenido constante a 30 W para todas las pruebas según se recomienda en otros estudios. [10] La razón por la que no se ha variado en las pruebas se debe a que al ser reducida el PDMS no responde ante el plasma y no consigue adherir las capas. El elevar esta potencia reduce considerablemente el tiempo necesario para el pegado, pero se vuelve difícil de controlar y puede dañar las muestras impidiendo que puedan pegarse. Se ha decidido mantener este parámetro constante para obtener pegados seguros y un cálculo de tiempos más preciso.

5 CONCLUSIONES

Tras la realización de las pruebas que se han realizado se ha aprendido mucho del PDMS, del plasma y de cómo realizar el proceso de pegado. Se han estudiado diferentes formas de realizar el proceso y medir los resultados buscando siempre la optimización tanto del proceso como de la medición. tras la tarea que supuso encontrar la mejor forma de obtener las medidas, el desarrollo de las pruebas fue cuestión de ensayo y error. Las numerosas pruebas realizadas han dado mucho que hablar sobre el PDMS.

5.1. Conclusiones

En primer lugar se creía que el método del uso del plasma como tecnología para la adhesión del material podría ser difícil de aplicar y que los resultados no serían tan buenos como los que se obtienen con otras técnicas. Si bien existen varios procedimientos para pegar el PDMS con PDMS u otras sustancias, es cierto que algunos son mejores que otros en ciertos aspectos, como por ejemplo, el uso de adhesivos o la técnica del curado parcial. El pegado con plasma de oxígeno permite realizar de forma rápida, barata y eficiente el pegado de las capas de PDMS para una aplicación. Mientras que otras técnicas tardan horas e incluso días en obtener el pegado, el plasma permite realizar el proceso en pocos minutos, tal como se ha comprobado en el laboratorio. Es una técnica limpia que no necesita de ningún tipo de producto químico y los trozos de PDMS quedan limpios de agentes contaminantes en el gas.

En el procedimiento se han manipulado los diferentes parámetros que intervienen en el pegado y se ha estudiado cómo mejorar la técnica manipulándolos. Esto se ha realizado mediante diferentes pruebas donde se ha podido observar el comportamiento del PDMS y la eficiencia de la técnica. Con una elección cautelosa de los parámetros del proceso podemos obtener una adhesión fuerte y que otras técnicas no pueden alcanzar. Esto puede ser beneficioso para propulsar el PDMS como material para el desarrollo de dispositivos MEMS en los próximos años, así como para revolucionar el mundo de la ingeniería biomédica, dándonos la posibilidad de dar forma y trabajar con un material difícil, pero con propiedades excelentes para este campo. La creación de sistemas biocompatible podrá dar lugar a un sin fin de aplicaciones médicas que puedan implementarse en el cuerpo humano, e incluso contribuir a la invención de implantes y órganos artificiales.

Los parámetros bajo los que se rige el proceso que se han podido determinar son la presión del gas con la que se genera el plasma, la cantidad de PDMS a pegar, y el tiempo de exposición del PDMS al plasma. Se ha podido determinar que el primer parámetro no afecta demasiado a la fuerza del pegado y que ante cualquier valor de este parámetro se puede producir el pegado. No obstante, si se usa una presión menor a 1.5 milibares se aprecia un descenso de la presión necesaria para despegar las muestras. El segundo parámetro, la cantidad de plasma a pegar afecta de forma proporcional a la fuerza del pegado dado que la cantidad de PDMS a separar será mayor, siendo requerida una mayor presión para lograr tal propósito. Finalmente, el parámetro que ha resultado más decisivo a la hora de producir la unión ha sido el tiempo de exposición al plasma. Este tiempo debe oscilar entre los 45 y los 55 segundos para alcanzar un pegado aceptable. En caso de aplicar el plasma durante un tiempo menor produce que no toda la superficie del PDMS se active, creando un pegado uniforme y débil. El exceso de tiempo de aplicación del plasma produce un efecto adverso, afectando a la superficie del PDMS hasta el punto de cambiar su estructura molecular, generando una envoltura de óxido alrededor del PDMS que no podría ser pegada al PDMS puro.

En la figura 5-1. se puede observar de una forma más gráfica cómo afectan las variables al proceso.

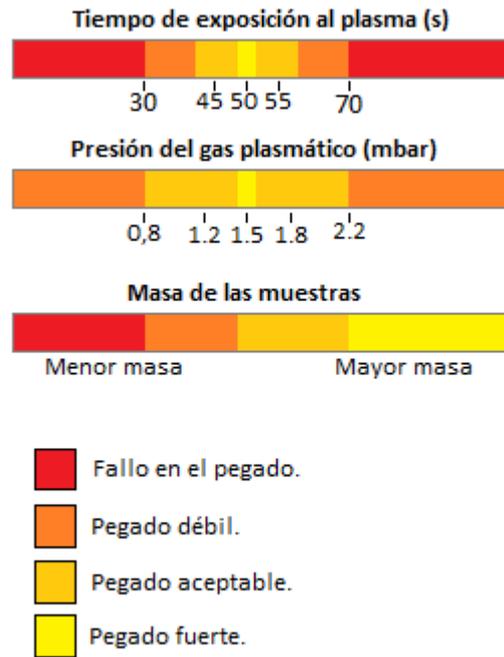


Figura 5-1. Representación gráfica de la calidad del pegado respecto a las variables que intervienen en el proceso.

Dependiendo de la aplicación variarán los parámetros que necesitemos utilizar, y por tanto variará la forma de llevar a cabo el proceso de pegado. En aplicaciones biomédicas o MEMS de microfluidos donde la alineación de las partes de PDMS a pegar sea obligatoria será necesario algún sistema que permita un pegado de gran precisión, pero eso escapa de lo que concierne al estudio de este trabajo. El tratamiento con plasma es una herramienta útil que podrá aplicarse y mejorarse durante los próximos años.

5.2. Futuras líneas de investigación

Este trabajo ha estudiado la tecnología del plasma como herramienta para el pegado del PDMS. Este proceso podrá servir de respaldo a una gran multitud de aplicaciones MEMS que necesiten usar el PDMS como material de fabricación. Las propiedades del PDMS son inauditas y de gran utilidad en una multitud de industrias, como la textil y la biomédica.

Haciendo un énfasis en las aplicaciones biomédicas que se respaldan en el PDMS tenemos una amplia gama de dispositivos biocompatibles y una gran familia de sensores y actuadores fabricados y por fabricar a día de hoy para detectar anomalías en el organismo y combatir ciertos virus e irregularidades sin dañar los tejidos. Ejemplos de esto son la detección de células cancerosas mediante MEMS ópticos. La industria de las telecomunicaciones tiene en el PDMS un poderoso aliado a la hora de diseñar y fabricar fibras ópticas. Su transparencia, su flexibilidad y sus propiedades aislantes lo hacen un buen material para crear fibras ópticas de alta velocidad. Sólo el tiempo dirá si el PDMS se corona como la materia prima para las fibras ópticas en los próximos años. Otras industrias pueden aprovechar el PDMS y el plasma como material barato, flexible y manejable con una multitud de fines para sacar provecho a estas propiedades extraordinarias.

Aunque este trabajo se basa exclusivamente en el pegado del PDMS con PDMS se han desarrollado técnicas basadas en plasma para adherirlo a otras sustancias como el vidrio. [11] Esto abre otro mundo de posibilidades para las MEMS al poder combinar el PDMS con otras sustancias y desarrollar aplicaciones mixtas. Un ejemplo puede ser la unión de cobre con PCB para crear circuitos protegidos contra ruido, o bien crear pistas de cobre sobre el PDMS para fabricar circuitos flexibles, aislantes térmicos e hidrófilos. Esto abre una línea de investigaciones que llevará a una infinidad de innovaciones tecnológicas pudiendo cubrir todas las debilidades de la electrónica actual

Manual para el pegado de PDMS con PDMS mediante plasma de oxígeno

1. Obtener una mezcla de PDMS sin curar con la proporción PDMS con Agente curante deseada. Se recomienda el uso de la relación 10:1 si la aplicación no tiene requisitos de flexibilidad o rigidez.
2. Fabricar un molde con la forma deseada para las piezas de PDMS a pegar.
3. Vertir el compuesto sobre el Molde y desgasificar durante 30 minutos. El PDMS puede ser desgasificado previamente al vertido, el orden no afecta al resultado.
4. Hornear el montaje durante una hora. En ese tiempo el PDMS se habrá curado por completo y endurecido. Extraer con precaución para evitar quemaduras.
5. Elegir las muestras de PDMS que van a pegarse. Es importante que las superficies sean planas y estén lo más limpias posible para obtener un buen pegado. También hay que decidir cuales serán las caras que se unirán entre sí.
6. Encender la máquina Zepto. (Pulsar botón Power On).
7. Realizar un vacío previo cerrando la tapadera y pulsando el botón de la bomba. Si no se realiza el vacío correctamente, cambiar el aceite de la bomba de vacío. Tras unos minutos de generar el vacío en la cámara, los restos de polvo y sustancias contaminantes se habrán eliminado de su interior.
8. Introducir las piezas de PDMS que deseamos pegar con las caras que participarán en el pegado boca arriba. Debe hacerse de este método ya que el plasma afecta a la superficie sobre la que se aplica.
9. Realizar de nuevo el vacío hasta que el indicador de presión llegue a su valor mínimo. Cuando esto ocurra, comenzará la aplicación del plasma.
10. Activar el plasma con el interruptor y ajustamos con la manivela la presión del gas que se introducirá a la cámara. Para un buen pegado, mantener esta presión sobre unos 1.5 mbar.
11. Esperar unos 50 segundos. Se puede configurar este tiempo mediante el temporizador para el apagado automático del generador de plasma.
12. Apagar botón de vacío y encender el de ventilación. En unos segundos se abrirá la tapadera y se podrá extraer las muestras. Una vez extraídas, usar pinzas limpias para manipular las piezas y poner en contacto las dos superficies que van a pegarse. Aplicar algo de presión para asegurar que entran en completo contacto. Conviene dejar unos minutos a las piezas como reposo antes de realizar el pegado.
13. Una vez unidas las piezas, dejar reposar durante una hora. En ese tiempo, las moléculas cuyos enlaces han sido rotos se recombinarán con las de la otra capa de PDMS, haciendo firme la unión.

Hoja de catálogo del PDMS utilizado durante el desarrollo del trabajo.

Kit Sylgard 184.

Product Information Electronics



Sylgard[®] 184 Silicone Elastomer

FEATURES & BENEFITS

- Flowable
- Room temperature and heat cure
- Good dielectric properties
- Rapid, versatile cure processing controlled by temperature
- High transparency allows easy inspection of components

COMPOSITION

- Two-part
- 10 to 1 mix ratio
- Polydimethylsiloxane elastomer

Transparent encapsulant with good flame resistance

APPLICATIONS

Sylgard[®] 184 Silicone Elastomer is suitable for:

- LED Lighting encapsulation
- Power supplies
- Connectors
- Sensors
- Industrial controls
- Transformers
- Amplifiers
- High voltage resistor packs
- Relays
- Adhesive/encapsulant for solar cells
- Adhesive handling beam lead integrated circuits during processing

TYPICAL PROPERTIES

Specification Writers: These values are not intended for use in preparing specifications. Please contact your local Dow Corning sales office or your Global Dow Corning Connection before writing specifications on this product.

Property	Unit	Result
One or Two Part		Two
Color		Colorless
Viscosity (Base)	cP	5100
	Pa-sec	5.1
Viscosity (Mixed)	cP	3500
	Pa-sec	3.5
Thermal Conductivity	btu/hr ft ² F	0.15
	W/m °K	0.27
Specific Gravity (Cured)		1.03
Working Time at 25°C (Pot Life - hours)	hours	1.5
Cure Time at 25°C	hours	48
Heat Cure Time at 100°C	minutes	35
Heat Cure Time at 125°C	minutes	20
Heat Cure Time at 150°C	minutes	10
Durometer Shore		43
Dielectric Strength	volts/mil	500
	kV/mm	19

TYPICAL PROPERTIES (Continued)

Property	Unit	Result
Volume Resistivity	ohm*cm	2.9E+14
Dissipation Factor at 100 Hz		0.00257
Dissipation Factor at 100kHz		0.00133
Dielectric Constant at 100 Hz		2.72
Dielectric Constant at 100 kHz		2.68
Linear CTE (by DMA)	ppm/°C	340
Tensile Strength	PSI	980
	MPa	6.7
	Kg/cm ²	69
Refractive Index	@ 589 nm	1.4118
Refractive Index	@ 632.8 nm	1.4225
Refractive Index	@1321 nm	1.4028
Refractive Index	@ 1554 nm	1.3997
UL RTI Rating	°C	150

DESCRIPTION

Dow Corning[®] brand silicone 10 to 1 encapsulants are supplied as two-part liquid component kits. When liquid components are thoroughly mixed, the mixture cures to a flexible elastomer, which is well suited for the protection of electrical/electronic applications. *Dow Corning* silicone encapsulants cure without exotherm at a constant rate regardless of sectional thickness or degree of confinement.

Dow Corning[®] silicone elastomers require no post cure and can be placed in service immediately following the completion of the cure schedule. Standard silicone encapsulants require a surface treatment with a primer in addition to good cleaning for adhesion while primerless silicone encapsulants require only good cleaning.

APPLICATION METHODS

- Automated metered mixing and dispensing
- Manual mixing

MIXING AND DE-AIRING

The 10 to 1 mix ratio these products are supplied in gives one latitude to

tune the modulus and hardness for specific application needs and production lines. In most cases de-airing is not required.

PREPARING SURFACES

In applications requiring adhesion, priming will be required for many of the silicone encapsulants. For best results, the primer should be applied in a very thin, uniform coating and then wiped off after application. After application, it should be thoroughly cured prior to application of the silicone elastomer. Additional instructions for primer usage can be found in the information sheets specific to the individual primers.

PROCESSING/CURING

Thoroughly mixed *Dow Corning* silicone encapsulant may be poured/dispensed directly into the container in which it is to be cured. Care should be taken to minimize air entrapment. When practical, pouring/dispensing should be done under vacuum, particularly if the component being potted or encapsulated has many small voids. If this technique cannot be used, the unit should be evacuated after the silicone encapsulant has been

poured/dispensed. *Dow Corning* silicone encapsulants may be either room temperature (25°C/77°F) or heat cured. Room temperature cure encapsulants may also be heat accelerated for faster cure. Ideal cure conditions for each product are given in the product selection table.

POT LIFE AND CURE RATE

Cure reaction begins with the mixing process. Initially, cure is evidenced by a gradual increase in viscosity, followed by gelation and conversion to a solid elastomer. Pot life is defined as the time required for viscosity to double after base and curing agent are mixed and is highly temperature and application dependent. Please refer to the data table.

USEFUL TEMPERATURE RANGES

For most uses, silicone elastomers should be operational over a temperature range of -45 to 200°C (-49 to 392°F) for long periods of time. However, at both the low and high temperature ends of the spectrum, behavior of the materials and performance in particular

Hoja de catálogo de la serie Zepto de Diener Electronics
para equipos de tratamiento
con plasma en superficie de bajo coste.

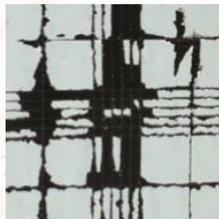
ZEPTO / ATTO

diener
electronic
Plasma-Surface-Technology

The pictures clearly show how different surfaces can be manipulated by means of targeted plasma treatment. The untreated materials can be seen in the left column, and the plasma treated surfaces on the right.



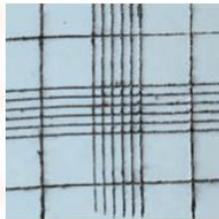
Water drop on untreated metal



Grid cut test on untreated PP



Water drop on plasma treated metal



Grid cut test on plasma treated PP

Applications

- Analysis (SEM,TEM)
- Archaeology
- Automotive industry
- Elastomer industry
- Medical technology
- Plastic industry
- Research and development
- Semiconductor industry
- Small scale manufacturing
- Sensor technology
- Textile treatment
- PDMS



LABS-Test, which tests for silicone contamination, of a silicone containing sample



LABS-Test after plasma cleaning

ZEPTO / ATTO

diener
electronic
Plasma-Surface-Technology

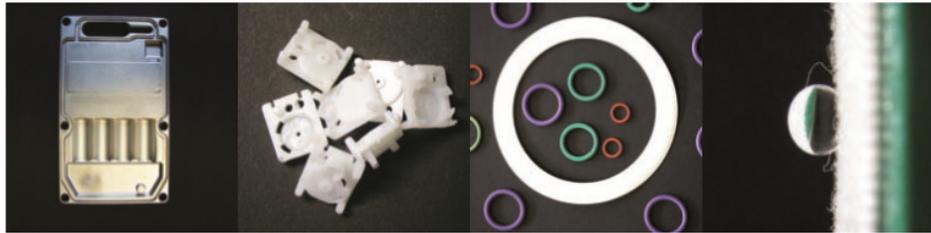
LOW COST

Low Pressure Plasma Systems



ZEPTO / ATTO

Plasma technology can be used on different materials such as glass, metal, plastics, textiles and ceramics.



- **Surface Cleaning**

(e.g. before bonding, soldering or gluing)

Organic remains are chemically transformed during the plasma process. The surface is subjected to a fine cleaning. Nearly all materials can be cleaned with an oxygen plasma.

- **Surface Activation**

(e.g. before printing, varnishing or gluing)

Plasma activation is used to transform non-polar surfaces such as plastics (PDMS, PE, PP, ...) into adhesive surfaces. The surface energy is increased without damaging the material's properties.

- **Surface Etching**

(e.g. before microstructuring of silicon or etching of PTFE)

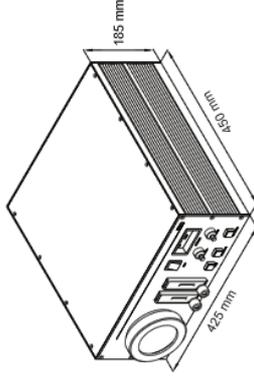
Teflon surfaces must be etched in order to become hydrophilic. Plasma etching is performed without aggressive chemicals.

- **Surface Deposition - plasmapolymerization**

(e.g. depositing of hydrophobic / hydrophilic layers)

Monomers with a suitable vapor pressure are implemented and used to produce various effects on the surface.

Technical Data



ZEPTO

Weight:

approx. 15 kg (33 lbs) without pump

Plasma Chamber:

Ø 105 mm (4.1 in), L 300 mm (11.8 in)
Chamber volume: approx. 2.6 litres
(0.69 gallons)

Gas Connection:

Two gas channels via needle valve without magnet valve opening

Plasma Power Supply:

40 kHz / 100 W, infinitely variable or optional 13,56 MHz / 50 W

Electric Control:

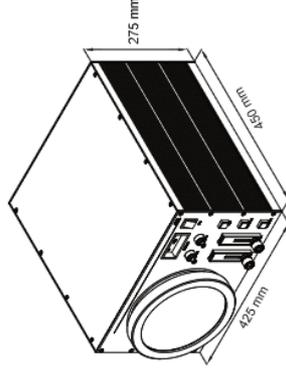
Manual, Timer, process time

Connections:

Gas: 6 mm Swagelok (0.24 in)
Pipe: 4 mm in, 6 mm out (0.16 in, 0.24 in)
Power supply: 220 V - 240 V AC / 6 A, 50 - 60 Hz
Exhaust tube: Ø 10mm (0.4 in)

Vacuum Pump:

Rotary vane pump 2.5 m³/h (660 gallons / h)



ATTO

Weight:

approx. 20 kg (44 lbs) without pump

Plasma Chamber:

Ø 211 mm (8.3 in), L 300 mm (11.8 in)
Chamber volume: approx. 10.5 litres
(2.77 gallons)

Gas Connection:

Two gas channels via needle valve without magnet valve opening

Plasma Power Supply:

40 kHz / 200 W, infinitely variable or optional 13,56 MHz / 50 W

Electric Control:

Manual, Timer, process time

Connections:

Gas: 6 mm Swagelok, (0.24 in)
Pipe: 4 mm in, 6 mm out (0.16 in, 0.24 in)
Power supply: 220 V - 240 V AC / 6 A, 50 - 60 Hz
Exhaust tube: Ø 10mm (0.4 in)

Vacuum Pump:

Rotary vane pump 2.5 m³/h (660 gallons / h)

REFERENCIAS

- [1] R. Maboudian, «Surface processes in MEMS technology». revista p. 1998.
- [2] Kristofer S.J. Pister, «Introduction to MEMS Design and Fabrication,».
- [3] Fernando Márquez y Clara Luján, «Apuntes de Electrónica Integrada,» .
- [4] J. M. Quero y Francisco Perdigones, «Apuntes de Microsistemas».
- [5] A. Horn, «Plasma Parameters,» .
- [6] Prime Faraday Partnership, «An Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems),».
- [7] Bruce K. Gale, «Determining the optimal PDMS PDMS bonding technique for microfluidic devices» . revista p. Abril 2008.
- [8] A. Santiago y S. Vázquez, «Propiedades físico-químicas de membranas PDMS empleadas en lentes líquidas,» . Revista p. Septiembre 2009.
- [9] Mark E. McNie, «Plasma Processes for Emerging Silicon-Based MEMS, NEMS and Packaging Applications,» .
- [10] S. Henry, « PDMS-PDMS Bonding Protocol,» . revista p. Mayo 2015.
- [11] R. Dung, «PDMS-Glass Bonding Protocol,» . revista p. September 2015.

