
MEMS FABRICACIÓN DE MICROMOTORES

Mems Fabricación de Micromotores

Lizeth Barrera López.

Estudiante de ingeniería en sistemas automotrices UPIIH¹

Joel Lucio Sánchez.

Estudiante de ingeniería mecatrónica UPIIH¹

Dra. Griselda Stephany Abarca Jiménez^{1,2}

M. en I. Jesús Mares Carreño¹

¹UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE INGENIERÍA CAMPUS HIDALGO
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CIUDAD DEL CONOCIMIENTO Y LA CULTURA, CARRETERA PACHUCA-ACTOPAN km 1+500,
SAN AGUSTÍN TLAXIACA
HIDALGO, MEXICO

²gabarcaj@ipn.mx, correo electrónico de contacto

Abstract

The micro electromechanical systems (MEMS) in recent years have received great interest due to the tasks they can develop. There are different microfabrication techniques of a MEMS, each of them follows established processes and they are developed to meet specific needs. Some of the manufacturing techniques are presented in this document based on an electrostatic micromotor. The exploitation the utility of the MEMS has been looked for by trying to include in the same silicon chip mechanical structures such as electrostatic micromotors that are part of the MEMS family and electronic systems, it is possible to integrate electronics and micromotors in a substrate thanks to CMOS technology since this is compatible with microfabrication processes of the MEMS. In the present document an electrostatic micromotor is presented, as well as some manufacturing techniques of such micromotors, as well as the CMOS MEMS relation.

1. Introducción

En los últimos años los Sistemas micro electromecánicos (MEMS) han generado gran interés debido a las aplicaciones que se les puede brindar en distintas áreas tales como ingeniería o medicina. Los MEMS varían en la medida de $1\mu\text{m}$ a 1mm , éstos son un sistema a micro escala que realizan diferentes funciones como percepción, procesado de datos, comunicación y actuación sobre el entorno (oSc, 2011). Los micromotores electrostáticos son dispositivos que forma parte de la familia MEMS, éstos son actuadores rotativos que proporcionan movimientos graduales o continuos. Entre las técnicas de micro fabricación de los MEMS se encuentran: fotolitografía, micromaquinado volumétrico, LIGA (Abreviatura de las palabras LItographie, Galvanoformung, Abformtechnik; litografía, galvanizado y modelado), y micromaquinado superficial. Cada una de las técnicas mencionadas tiene ventajas y procesos específicos. La perspectiva de un gran avance hacia los microsistemas inteligentes es desarrollar dispositivos en los que sea posible integrar estructuras MEMS con circuitos electrónicos; desarrollar una estructura MEMS compatible con CMOS de igual manera ha sido un tema de gran interés (Ching-Liang Dai et al 2002 J. Micromech. Microeng. 12 247, 2002), a día de hoy crear tales dispositivos es posible gracias a que la tecnología CMOS (Metal-Óxido-Semiconductor-Complementario) utilizada para desarrollar circuitos integrados es compatible con los procesos de micro fabricación de los MEMS. En este documento se define un micromotor electrostático así como las posibles técnicas de fabricación MEMS y la relación CMOS-MEMS.

2. Micromotor electrostático; características y diseño

Existen diversos tipos de microsistemas, entre ellos se encuentran los actuadores; diseñados para proporcionar estímulos a otros componentes o dispositivos MEMS, tales actuadores son operados electrostática o térmicamente (oSc, 2011). En el caso de micromotores electrostáticos el principio de movimiento se rige por fuerzas electrostáticas entre los polos del estator y los polos del rotor, las cargas eléctricas inducidas en el rotor son atraídas por cargas eléctricas del estator, generando una fuerza electrostática que crea un par mecánico en el rotor del micromotor (Humberto ferreira Vinhais, Paulo H. de Godoy, Emilio Carlos Nelli Silva, 2006).

La estructura de un micromotor electrostático se presenta en la sección transversal de la figura 1. Los parámetros en el diseño de cada elemento tienen una relación directa con el voltaje de

accionamiento del micromotor, por ejemplo, al aumentar el número de dientes del rotor aumenta el par motor, por lo que se necesita mayor voltaje para producir movimiento.

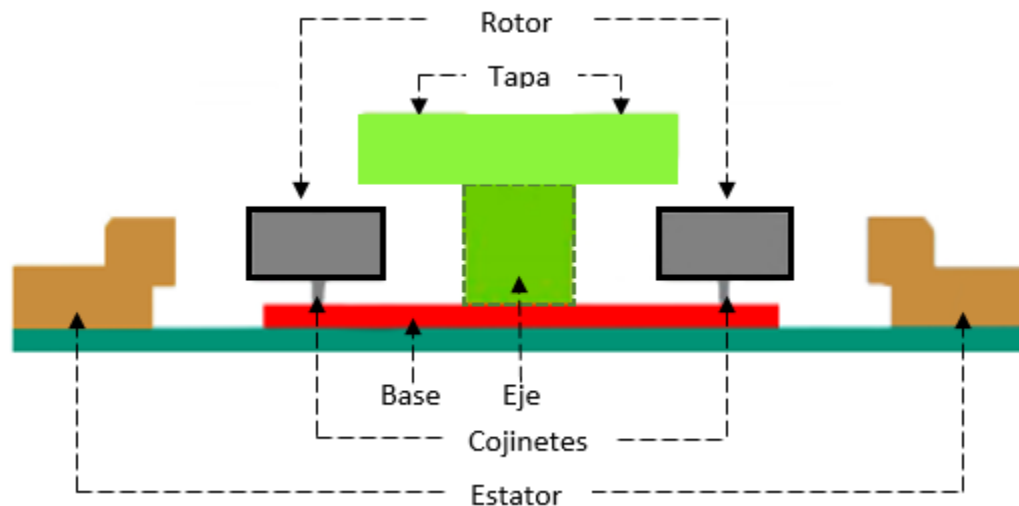


Figura 1. Estructura de un micromotor electrostático.

Uno de los mayores retos en el diseño de un micromotor electrostático es establecer parámetros que contribuyan a reducir la fricción y desgaste producidos entre los cojinetes del rotor y el sustrato. El primer micromotor fabricado tuvo un voltaje de accionamiento de 100V y un diámetro en su rotor de 130 μ m.

- A continuación se muestra un ejemplo de diseño de un micromotor electrostático realizado por (A. Basha, Safavi-Naeini, & K. Chaudhuri, 2007); El propósito del diseño es producir un par motor suficiente para vencer la fricción entre los cojines del rotor y la base con un voltaje bajo (16V). Tal diseño se basó en el cambio de las dimensiones en el rotor y estator; en el ancho de los polos del rotor (r_{pw}), en el paso de los polos del rotor (r_{pp}) así como en el ancho de los polos del estator (s_{pw}) y en el paso de los polos del estator (s_{pp}). Se introdujo un nuevo parámetro (θ_{sh}), el cual representa la forma que toman los polos del rotor, en este caso se optó

por una forma trapezoidal. En la figura 2 se muestran los parámetros del diseño del micromotor.

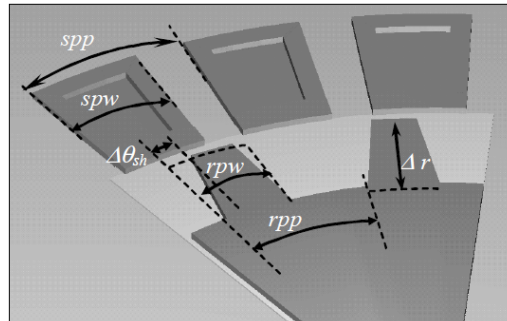


Figura 2. Parámetros del diseño de un micromotor electrostático, Δr representa la altura de los dientes del rotor (Imagen obtenida del trabajo de Mohamed A. Basha, 2016).

El diámetro del rotor es de $800\mu\text{m}$, la tabla 1 contiene las características del resto de los parámetros.

Tabla 1 Dimensiones físicas del micromotor fabricado (tabla obtenida del trabajo de Mohamed A. Basha, 2006).

parámetros	Radio del rotor	Brecha entre el rotor y el estator	rpp	rpw	spp	spw	Δr	Diámetro de los cojinetes
Valor	$400\mu\text{m}$	$2.25\mu\text{m}$	2.25°	1.2°	1.5°	1.2°	$30\mu\text{m}$	$70\mu\text{m}$

El voltaje de accionamiento de este micromotor fue de 14V con 1.25 rpm.

Los parámetros para el diseño de un micromotor se modifican de acuerdo a las características requeridas y el propósito para el cual es diseñado.

3. CMOS MEMS

Las aplicaciones de los MEMS son aprovechables en diversos campos, según las necesidades que se requieran satisfacer, la estructura MEMS puede ser muy sencilla o bien, muy compleja. Debido a esto se ha buscado explotar al máximo las funcionalidades de los MEMS, una manera de hacerlo es desarrollar microestructuras que integren actuadores y sistemas de control. El propósito de MEMS exige la integración directa de estructuras mecánicas con componentes electrónicos que normalmente se fabrican mediante tecnología CMOS. En las últimas décadas se han realizado grandes esfuerzos para integrar estructuras MEMS con circuitos integrados (IC) en un único sustrato, a lo que hace referencia el término CMOS MEMS (Qu, 2016). La combinación de los MEMS con circuitos integrados ejerce un potente desarrollo en los microsistemas inteligentes. Los procesos de fabricación de las estructuras MEMS con los circuitos electrónicos pueden preceder al proceso CMOS (“pre-CMOS”), también puede llevarse a cabo entre el proceso CMOS (“inter-CMOS”), o después del proceso CMOS (“post-CMOS”) (Chiu, 2015).

4. Técnicas de fabricación de un micromotor electrostático

Los dispositivos MEMS se fabrican habitualmente a partir de obleas de silicio, uno de los elementos básicos en la fabricación de MEMS es la capacidad de deposición de películas delgadas de materiales sobre un sustrato (oSc, 2011). Diversas técnicas de micromaquinado pueden ser utilizadas para la fabricación de MEMS micromotores, el proceso de fabricación de cada técnica converge a la caracterización física sobre un sustrato mediante capas de diversos

materiales que posteriormente pueden ser sacrificadas o eliminadas, lo que da por resultado las estructuras esperadas sin embargo difieren en los procesos de fabricación.

A continuación se presentan algunas técnicas utilizadas para la fabricación de micromotores electrostáticos así como los procesos determinados para la técnica respectiva.

4.1 Fotolitografía

Consiste en cubrir el sustrato con una película sensitiva a la luz, después de ello se irradia la luz ultravioleta a través de máscaras, se imprime una imagen de la máscara, es decir, se utiliza la luz para dibujar el diseño de la máscara sobre el sustrato, la luz atraviesa las partes transparentes de la máscara y ataca el sustrato imprimiendo el diseño establecido. Finalmente el diseño se obtiene eliminando las partes expuestas de la luz mediante ataques químicos.

Como ejemplo de esta técnica de fabricación se presentan los pasos en la fabricación del micromotor electrostático desarrollado por Humberto Ferreira V, Paulo Henrique de Godoy y Emilio Carlos Nelli S. La fabricación se divide en dos partes; la fabricación del rotor, y la fabricación del estator y el eje.

1. Para fabricar el estator y el eje primero se prepara el sustrato sobre el que se fabricara la estructura del micromotor
2. Se deposita la llamada capa "semilla"
3. Se genera la deposición del molde de diseño de la fotorresistencia utilizando la técnica de fotolitografía con exposición a UV
4. Se genera la electrodeposición tanto para el eje, rotor y estator. La estructura de la pista eléctrica (electrodeposición) crece dentro del molde foto resistente, para la galvanoplastia se usa oro con una altura inferior a las 10 micras
5. El molde foto resistente se elimina con acetona

6. Se lleva a cabo la deposición de la estructura del eje del micromotor y su estator, el mismo molde utilizado para generar la vía eléctrica se usa para crear el eje y el estator
 7. Se galvaniza el níquel dentro del mismo molde que contiene el eje y el estator, el estator se superpone a la estructura de la pista eléctrica garantizando el contacto eléctrico
 8. Se elimina el molde químicamente
9. La capa de semilla es retirada químicamente para evitar el contacto eléctrico entre el estator, el eje y la superficie correspondiente al rotor.

Para fabricar el rotor, las etapas 1 y 2 son exactamente iguales, sin embargo el tercer paso esta vez consiste en depositar una capa de sacrificio de cobre y posteriormente sobre esa capa se depositan estructuras fotorresistentes que fungen como molde para la estructura del rotor, ya que el molde está definido lo que se hace es galvanizar con níquel dentro de tal molde (esto indica que el níquel es el material de la estructura del rotor) y sobre la capa de sacrificio. El siguiente paso consiste en remover el molde del rotor. Finalmente la capa de sacrificio es eliminada mediante ataques químicos, y de esta manera se libera la estructura del rotor. El rotor se ensambla manualmente en el sustrato que contiene el eje y estator. (Humberto ferreira Vinhais, Paulo H. de Godoy, Emilio Carlos Nelli Silva, 2006).

4.2 Micromaquinado superficial

Esta técnica consiste en depositar sobre un sustrato capas de sacrificio y capas estructurales, a las que se les transfiere un patrón de grabado utilizando técnicas fotolitográficas. Al final de este proceso las capas de sacrificio se eliminan mediante el ataque de procesos químicos. El procedimiento se repite cuantas veces sea necesario para generar la microestructura requerida. Un ejemplo en la aplicación de esta técnica es la fabricación de un micromotor electrostático.

A continuación se muestran los pasos para la fabricación de un micromotor electrostático basado en el trabajo de los autores Dhananjay Babade, Rohit Soni, Shrinivas:

Sobre un sustrato de silicio se forma una primera capa de aislamiento (con nitruro de silicio) y sobre ella se forma una capa estructural de polisilicio (denominada poly0) en una región predeterminada de la capa de aislamiento. Posteriormente se deposita otra capa, esta vez de cristal de fosfosilicato (PSG oxide-1) sobre la capa estructural (poly0) y la superficie expuesta de la capa de aislamiento, el siguiente paso consiste en modelar las capas del PSG, las cuales forman los anclajes del estator así como los hoyuelos del rotor (que posteriormente fungirán como cojinetes) mediante técnicas de fotolitografía y grabado. A continuación se debe depositar una nueva capa estructural (poly1) sobre el PSG y la superficie expuesta de la capa de aislamiento. Se modela la primera capa de estructura (poly1) mediante técnicas de fotolitografía y grabado para formar el rotor. Se forma una segunda capa de óxido sobre las regiones del rotor y del estator, después de ello se modela la capa de óxido expuesta (oxido-2) para el diseño del estator. El siguiente paso es generar un grabado en la capa de sacrificio expuesta de PSG (oxido-2). Después de remover la primera mascara y depositar una segunda capa estructural (poly2), el siguiente paso es generar un grabado para formar un rodamiento que resida en la abertura de anclaje del rotor. Por último se genera la extracción de toda la capa de sacrificio de PSG (oxido) para liberar el rotor, de modo que el rotor sea soportado rotativamente por el cojinete. (Barbade D., Soni R., Metan S.)

4.3 La tecnología CMOS

Como se había mencionado antes, los procesos de fabricación de la tecnología CMOS no sólo se usan para fabricar circuitos integrados, sino también tienen la ventaja de poder ser utilizados en la fabricación de MEMS. A continuación se muestra el procedimiento seguido por el autor J.T Horstmann y K.F. Goser para elaborar una estructura con circuitos integrados encargados de accionar un micromotor electrostático. Se crea un almohadilla de óxido de 15nm por oxidación térmica y la deposición de una capa de nitruro de 80nm por deposición de vapor químico a baja presión (LPCVD), el primer paso de fotolitografía define las áreas activas de los circuitos CMOS, el rotor y el eje del micromotor. Esta capa de litografía se transfiere anisotrópicamente a la capa de nitruro mediante grabado con iones activos (RIE). El siguiente paso es el proceso de oxidación local de silicio (LOCOS) que se necesita para formar el óxido grueso para el proceso CMOS. Mediante la oxidación térmica húmeda, una capa de óxido de 300 nm de espesor crece en aquellas regiones que no están cubiertas por la capa de nitruro, esta capa de óxido en el micromotor es usada como capa de sacrificio. Posteriormente se elimina la capa de nitruro y se deposita una capa de polisilicio

mediante el proceso de deposición de vapor químico a baja presión. El siguiente paso de fotolitografía define todas las estructuras en la capa de polisilicio, en donde se define el estator, el rotor y el eje, sobre el rotor se definen varios orificios, posteriormente es necesario llenar tales orificios de manera uniforme y separar la siguiente capa de polisilicio de la primera. A continuación LPCVD deposita una segunda capa de polisilicio para generar la tapa del eje del rotor. Después de esto los orificios de contacto se graban y una capa de aluminio se deposita y estructura. Estos pasos son los mismos pasos del proceso CMOS estándar. El siguiente paso es el grabado del rotor, por lo tanto se aplica una etapa de grabado húmedo en una solución de HF. El diseño de los agujeros en el rotor es muy crítico para el proceso de grabado húmedo, ya que tiene como propósito separar el rotor del silicio que está por debajo, sin quitar el estator o el eje. (J.T.Horstmann, K.F.Goser, 2003).

5. Conclusiones

Realmente son bastantes las aplicaciones de los MEMS, la miniaturización trae consigo muchas ventajas, lo que conlleva a buscar técnicas de fabricación y de diseño que exploten al máximo el contexto MEMS. Las técnicas de fabricación así como el diseño de los MEMS micromotores se eligen de acuerdo a las aplicaciones para las cuales se tenga contemplado el micromotor; Cada técnica cuenta con procesos, ventajas y desventajas específicos.

Los sistemas micro-electromecánicos en conjunto con sistemas electrónicos son bastante prometedores en el desarrollo de microsistemas inteligentes, la sinergia entre estos dos generan una relación directa con el control y la actuación; los sistemas electrónicos normalmente se encargan del accionamiento de las estructuras mecánicas (por ejemplo de un micromotor).

No existe una técnica de fabricación mejor que otra ya que como se ha mencionado anteriormente las técnicas son seleccionadas de acuerdo a las características deseadas del micromotor (lo mismo sucede con el diseño). Sin embargo la técnica que presenta mayores ventajas para integrar electrónica con actuadores MEMS es el usado en la tecnología CMOS, dado que los procesos de fabricación son compatibles hace posible la integración de estructuras MEMS con circuitos integrados.

6. Referencias

- A. Basha, M., Safavi-Naeini, S., & K. Chaudhuri, S. (2007). Design and Fabrication of an Electrostatic Micromotor with a Low Operating Voltage. (IEEE, Ed.) Waterloo, Canada. doi:10.1109/SENSOR.2007.4300336

Barbade D., Soni R., Metan S. (s.f.). Micromotor Fabrication by Surface Micromachining Technique. *Proulx T. (eds) MEMS and Nanotechnology, volumen 2.*
doi:https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8825-6_20

Ching-Liang Dai et al 2002 *J. Micromech. Microeng.* 12 247. (28 de Marzo de 2002). Fabrication of the planar angular rotator using the CMOS process. *Ching-Liang Dai et al 2002 J. Micromech. Microeng.* 12 247. doi:<https://doi.org/10.1088/0960-1317/12/3/308>

Chiu, Y. (2015). Foundry Service and CMOS MEMS. Obtenido de
<http://www.eed.nctu.edu.tw/en/faculty/prof/Chiu-Yi-47799465>

Humberto ferreira Vinhais, Paulo H. de Godoy, Emilio Carlos Nelli Silva. (2006). *OPTIMIZED DESIGN OF AN ELECTROSTATIC SIDE-DRIVE*. Sao Paulo. Obtenido de
http://abcm.org.br/symposium-series/SSM_Vol2/Section_VI_Sensor_Actuators/SSM2_VI_09.pdf

J.T.Horstmann, K.F.Goser. (Junio de 2003). Alemania. Obtenido de
[https://doi.org/10.1016/S0167-9317\(03\)00094-7](https://doi.org/10.1016/S0167-9317(03)00094-7)

oSc. (2011). Tecnología MEMS. Obtenido de
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4966/fichero/e.+Tecnologia+MEMS.pdf>

Qu, H. (2016). *CMOS MEMS Fabrication Technologies and Devices*. Squirrel Road, Rochester, USA, Squirrel Road, Rochester, USA. doi:10.3390/mi7010014