

Capítulo 2. Estado del arte de los interruptores RF MEMS

Aunque los interruptores microelectromecánicos de radiofrecuencia (RF MEMS) han estado en investigación desde la década pasada, los problemas de tener un voltaje de actuación alto y fallas mecánicas debido al proceso de fabricación siguen presentándose. El principal factor a resolver en los RF MEMS es el de disminuir el voltaje de actuación y para eso se han propuesto diversos diseños que combinan los interruptores capacitivos, tipo puente, serie y cantiléver. Los primeros diseños de RF MEMS eran básicos, sin ningún tipo de optimización y se tenían resultados que no eran adecuados para poder utilizarlos con otras tecnologías, como la de los circuitos integrados. Sin embargo, las investigaciones, los estudios y el avance tecnológico para la fabricación, han ayudado a tener interruptores con diseños complejos, pero que logran respuestas adecuadas para cada campo en que se aplican.

En la actualidad, ya se encuentran comercializados diferentes tipos de RF MEMS y con base a estos, se han logrado realizar diferentes dispositivos que encontrarán aplicación en un futuro cercano [1].

Los métodos de fabricación de los MEMS son también diversos, pero se aprovecha la técnica existente de los circuitos integrados. Esto significa que en una oblea de silicio, se pueden producir miles de dispositivos semiconductores usando litografía. Por lo cual, se continua utilizando esta tecnología disponible para la fabricación de MEMS.

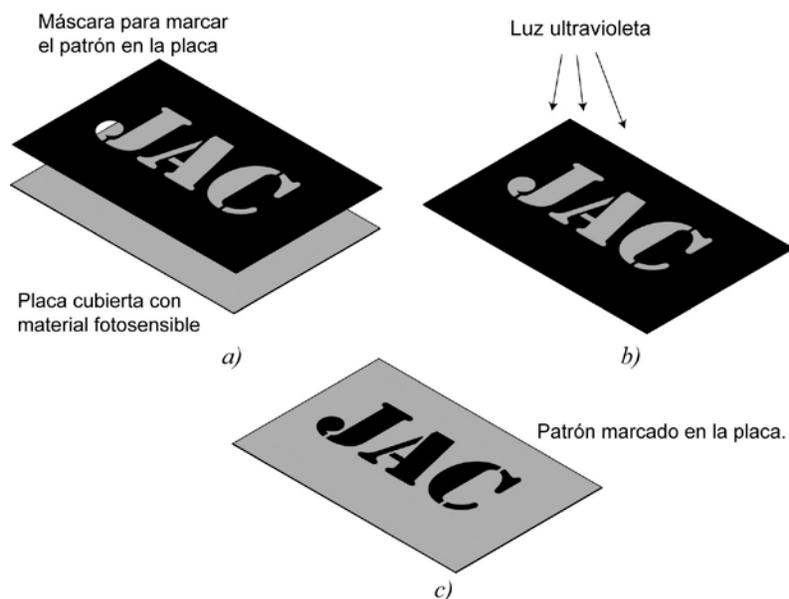


Figura 2.1. Proceso de litografía. (a) Se realiza una máscara que permita marcar el área que nos interesa cubrir, (b) se aplica luz ultravioleta para marcar el material fotosensible y (c) solo queda cubierto el patrón que nos interesa y que no se verá afectado cuando se retire el material sin cubrir.

La litografía es, por lo general, la transferencia de un patrón a un material fotosensible por exposición selectiva a una fuente de radiación. Un material fotosensible es un material que experimenta un cambio en sus propiedades físicas cuando se expone a la radiación, en general, luz ultravioleta.

Este proceso lo hemos usado para realizar circuitos impresos en una placa de baquelita recubierta con cobre.

Por lo regular, se cubre el material que no será removido, como se ve en la figura 2.1, mientras que el material que no deseamos, no se protege. El siguiente paso es aplicar una solución química para deshacerse del material que no se requiere y, finalmente, se tiene el circuito impreso [2].

También está el proceso de grabado húmedo (*wet bulk micromachining*) en el que el material se disuelve cuando se sumerge en una solución química. El material se pulveriza o se disuelve usando vapor, iones reactivos o un grabado de fase de vapor [3].

La correcta selección del método de fabricación, permite hacer un proceso efectivo y sobre todo rentable, ya que la producción en masa es más redituable que un proceso selectivo. Aunque existen diferentes métodos para la fabricación de los MEMS, en la mayoría de los casos es necesario realizar máscaras para realizar procesos litográficos, a excepción de la producción vía laser. Pero aun en la fabricación laser, se usan máscaras para definir las formas finales de los MEMS [4].

A continuación, haremos una revisión del estado del arte de los RF MEMS con los diseños más representativos.

2.1 Interruptor con multiactuación usando proceso de fabricación de circuito integrado CMOS [5]

Este interruptor utiliza dos métodos de actuación, térmico y electrostático. Ha sido fabricado para poder realizar una integración con dispositivos MEMS y circuitos integrados. La estructura del interruptor consiste en un conjunto de guías CPW sobre una línea de transmisión con membrana suspendida, esto es, un interruptor capacitivo. Ha sido desarrollado por el Industrial Technology Research Institute en Taiwan. Está fabricado sobre una estructura CMOS. Los resultados de este interruptor muestran que el voltaje de actuación es aproximadamente de siete volts. Las pérdidas de inserción son de -2.5 dB a 5 GHz, y el aislamiento es de -4.1 dB.

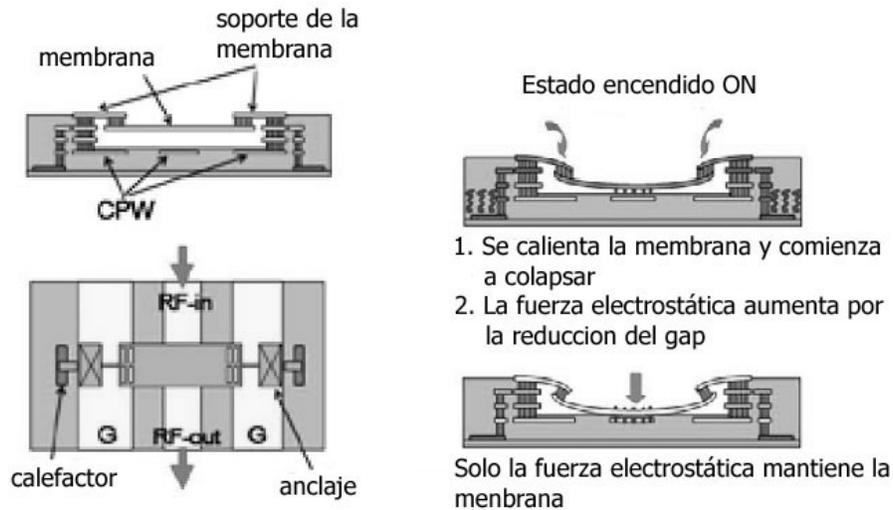


Figura 2.2. Mecanismo de actuación del interruptor.

Las ventajas de utilizar este interruptor son que requiere un voltaje de actuación muy bajo, debido al actuador térmico y que está fabricado en el mismo proceso CMOS de circuitos integrados, lo que le permite integrar directamente los bloques de RF y de control. Para llevar al interruptor en estado encendido "ON", se usan los dos actuadores y cuando se cambia a estado apagado "OFF", solo se usa el actuador electrostático. Cuando se incrementa la temperatura del actuador térmico, se comienza a doblar la membrana, lo suficientemente cerca para que al actuador electrostático lo termine de "jalar". Cuando se libera, solo es necesario quitar el actuador electrostático.

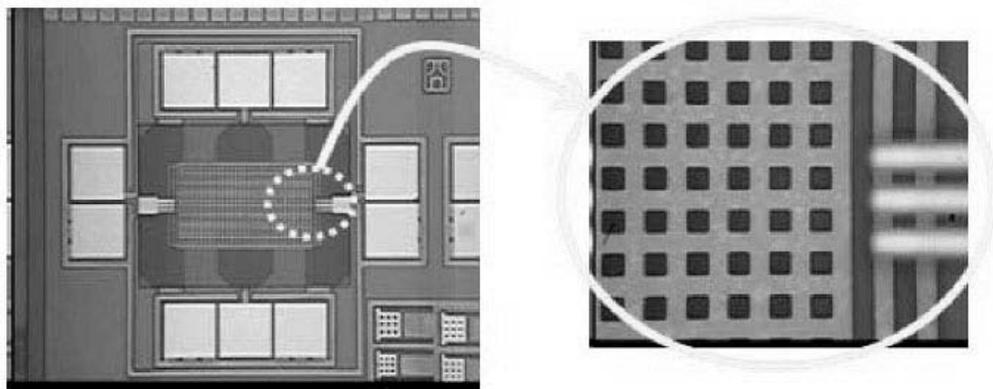


Figura 2.3. Microfotografía del interruptor mostrando los huecos en la membrana.

Desafortunadamente, la respuesta de este interruptor es muy pobre ya que los resultados muestran que tiene pérdidas de inserción mayores a un decibel a 5 GHz y aislamiento bajo a la misma frecuencia; sin embargo, el uso de dos mecanismos de actuación lo hacen atractivo y sobre todo la posible integración de este tipo de interruptores directamente en circuitos integrados CMOS.

Tabla 2.1 Características del interruptor multiactuación

	Voltaje de Actuación [V]	Pérdidas de inserción [dB]	Aislamiento [dB]	Frecuencia [GHz]	Sustrato
Interruptor con multiactuación CMOS	7	-2.5	-4.1	@ 5	Silicio de alta resistividad

2.2 Interruptor RF MEMS con voltaje de actuación bajo y sistema antipegajosidad [6]

Una causa frecuente de fallas en los RF MEMS es el fenómeno conocido como pegajosidad o adherencia dieléctrica (*stiction=static-friction se puede interpretar como adherencia estática o pegajosidad*), debido a la carga remanente de un dieléctrico y la adhesión de contactos. Este fenómeno ocurre con separaciones muy pequeñas entre membranas y electrodos y se puede reducir usando diferentes métodos de depósito, capas dieléctricas con propiedades diferentes o tratando de evitar el contacto entre los electrodos y las partes móviles.

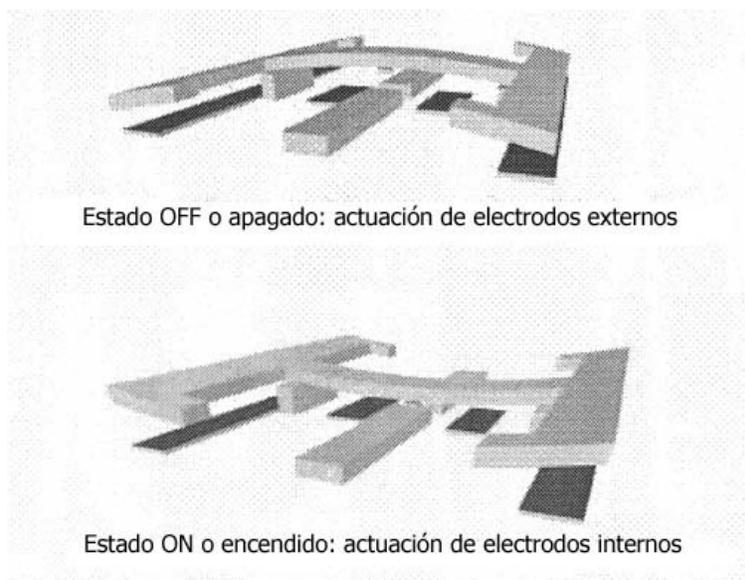


Figura 2.4. Estados del interruptor.

En el diseño siguiente, se tiene un RF MEMS que trata de evitar este problema usando cuatro electrodos, en lugar de dos y la membrana soportada por dos anclajes, sobre una línea de transmisión. El principio de funcionamiento es el siguiente, se activan los electrodos internos para poner el interruptor en estado encendido (ON) y cuando se libera, permanece en ese estado debido a la pegajosidad, por lo que, para liberar la membrana, se activan los electrodos externos y se logra liberar la membrana. Cabe mencionar que cuando se lleva el interruptor a estado ON, se aplica un voltaje positivo en los electrodos internos, y un voltaje negativo en los electrodos externos, con el fin de disminuir la rigidez de la membrana.

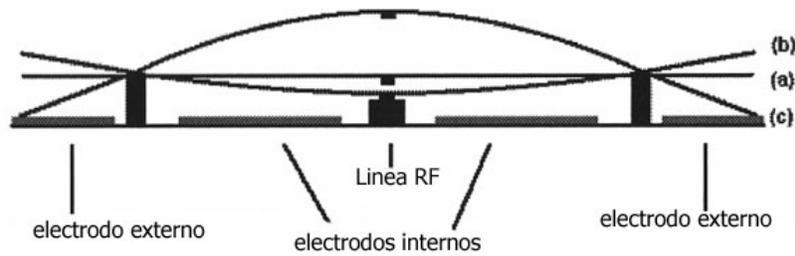


Figura 2.5. Estados de la membrana. a) Sin acción. b) Encendido. c) Apagado.

El interruptor tiene pérdidas de inserción de -0.45 dB y aislamiento de -30 dB a 10 GHz. Gracias a la actuación de los electrodos internos y externos, se logra un voltaje de actuación menor a 5 [V]. Para liberar la membrana de la pegajosidad es necesario aplicar un voltaje de 15 [V] durante 15 minutos. Con esto, se logra aumentar el número de ciclos de trabajo del interruptor.

Este interruptor está siendo desarrollado por el Institut d'Electronique, de Microélectronique, et de Nanotechnologie, en Francia.

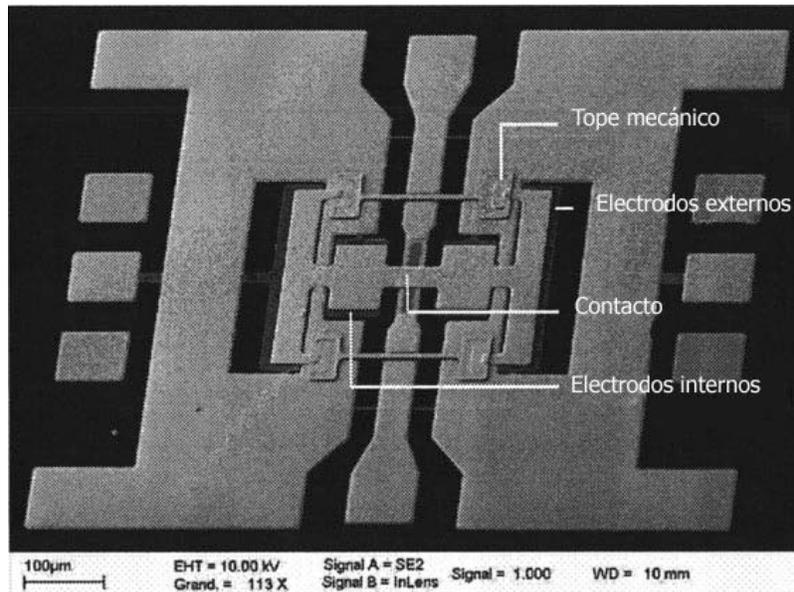


Figura 2.6. Fotografía microscópica del interruptor.

Tabla 2.2 Interruptor antipegajosidad

	Voltaje de Actuación [V]	Pérdidas de inserción [dB]	Aislamiento [dB]	Frecuencia [GHz]	Sustrato
Interruptor con voltaje de actuación bajo y sistema antipegajosidad	5	-0.45	-30	@ 10	Silicio de alta resistividad

2.3 Interruptor RF MEMS con bajo voltaje de actuación y diseño inédito del contacto [7]

Este diseño consiste en un interruptor de contacto metal-metal, fabricado sobre una línea de transmisión CPW. El sustrato es Alúmina (Al_2O_3) que tiene una constante dieléctrica ϵ de 9.9. Como vemos en la figura 2.7, tiene una pequeña *saliente* en la orilla (*dimple*), que sirve para eliminar la dependencia del contacto a las variaciones de fuerza residuales.

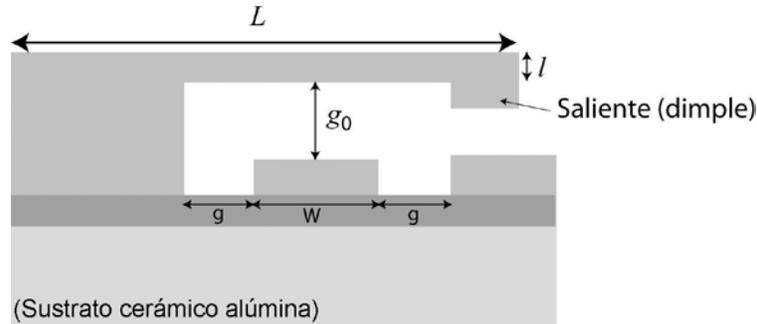


Figura 2.7. Interruptor cantiléver serie, donde W es el electrodo actuador.

La longitud del contacto es de $110 \mu\text{m}$ y el ancho es de $60 \mu\text{m}$, tal como se observa en la figura 2.8. La dimensión del contacto de $20 \mu\text{m}$, reduce el efecto de la *pegajosidad*. El diseño del interruptor es serie, pero se utiliza en una CPW (figura 2.9), ya que este tipo de guías presentan ventajas sobre las líneas microcintas, tales como: un acoplamiento menor a las líneas adyacentes, pérdidas de radiación menor en las discontinuidades y las microondas se propagan en modo casi transversal [8].

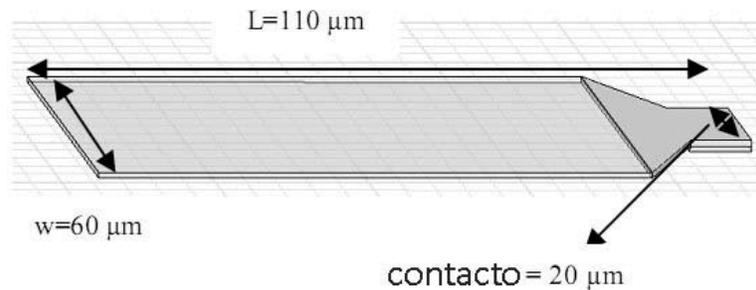


Figura 2.8. Dimensiones del interruptor.

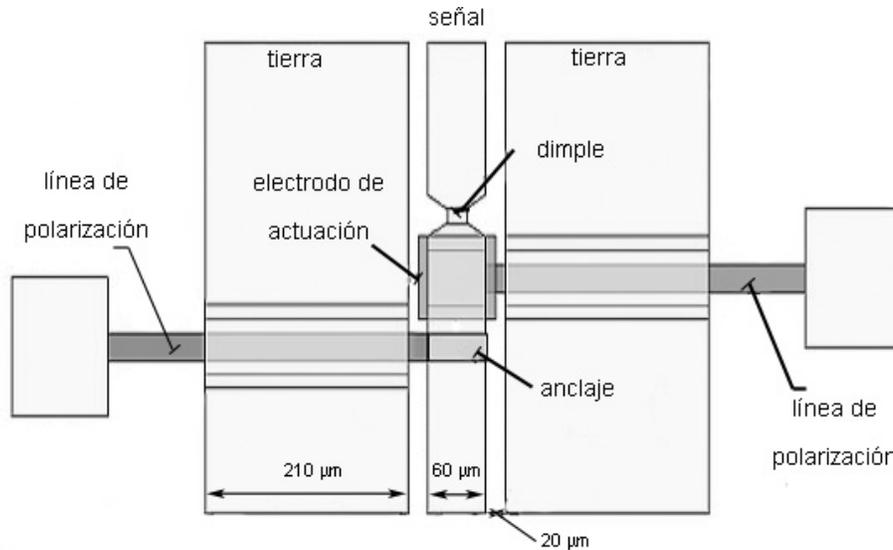


Figura 2.9. Modelo esquemático del interruptor, mostrándolo sobre una CPW.

Gracias a que se mejoró el diseño del cantiléver, se logró un voltaje de actuación de 6.39 [V] con 0.47 dB de pérdidas de inserción y un aislamiento de 23.5 dB hasta 40 GHz. El interruptor fue fabricado por la University of New South Wales en Australia. En la tabla 2.3 vemos las características del interruptor.

Tabla 2.3 Características del interruptor

	Voltaje de Actuación [V]	Pérdidas de inserción [dB]	Aislamiento [dB]	Frecuencia [GHz]	Sustrato
Interruptor con bajo voltaje de actuación y diseño inédito del contacto	6.39	0.47	23	@ 40	Alúmina

2.4 Interruptor RF MEMS con micropuente de carburo de silicio SiC, para mejorar la repetibilidad [9]

Este interruptor ha sido desarrollado por la NASA en conjunto con la Universidad Case Western de Cleveland. Consiste en un interruptor fabricado con carburo de silicio (SiC), ya que este material ofrece muchas ventajas y sobre todo, no es afectado por el fenómeno de la pegajosidad. Encima del puente hecho de SiC, se coloca una membrana de aluminio para poder activar el interruptor y no es necesario colocar un aislante entre la línea de transmisión y el puente, ya que el SiC es un aislante en sí mismo.

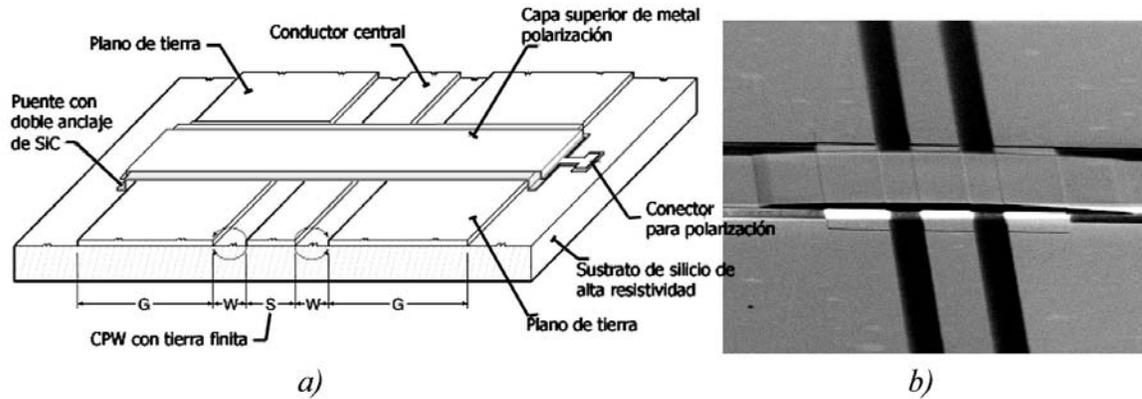


Figura 2.10. a) Esquemático del interruptor. b) Fotografía microscópica del interruptor mostrando el puente.

La línea de transmisión tiene un ancho central S de $130\ \mu\text{m}$, los planos de tierra G son de $300\ \mu\text{m}$ y el gap W , entre éstos es de $60\ \mu\text{m}$, lo que le da una impedancia característica Z_0 de $50\ \Omega$ (Figura 2.10). La línea de transmisión está hecha de oro y cromo con una dimensión de $1225\ \text{nm}$ de espesor. Desafortunadamente el voltaje de actuación es alto, $52\ \text{[V]}$. Sin embargo el interruptor de $500\ \text{nm}$ de espesor del puente, actúa de manera inmediata y de modo confiable cuando se apaga y enciende en forma casi continua.

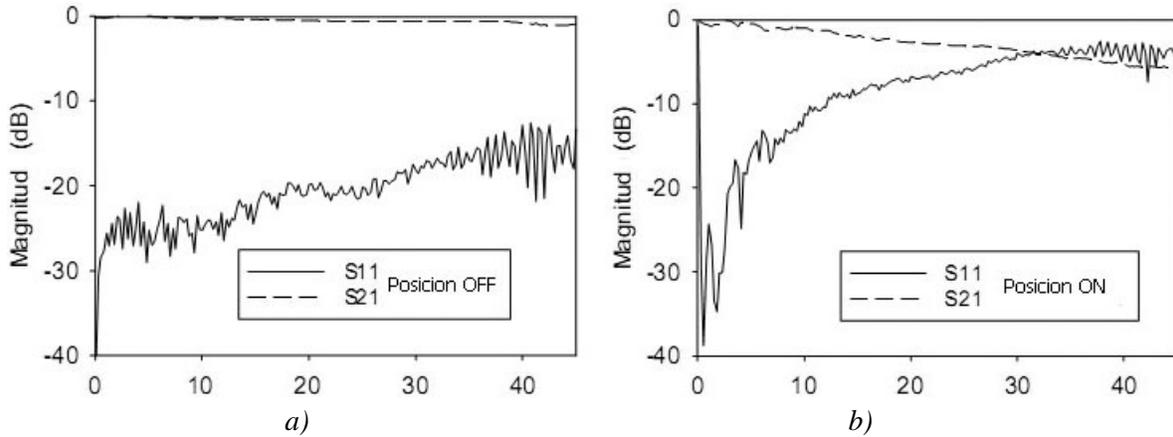


Figura 2.11. Interruptor MEMS de SiC. a) Posición apagado OFF. b) Posición encendido ON.

Las pérdidas de inserción son de $0.3\ \text{dB}$ de 0 a $45\ \text{GHz}$ y presenta un aislamiento de $-20\ \text{dB}$ de 10 a $45\ \text{GHz}$. Se han logrado ciclos de trabajo de hasta 500 mil cambios sin presentar deformación alguna y la respuesta en frecuencia es aceptable (Figura 2.11).

Tabla 2.4 Características del interruptor SiC

	Voltaje de Actuación [V]	Pérdidas de inserción [dB]	Aislamiento [dB]	Frecuencia [GHz]	Sustrato
Interruptor con micropuentes de carburo de silicio SiC	52	0.3	-20	@ 45	Silicio de alta resistividad

2.5 Interruptor RF MEMS con bajo voltaje de actuación y baja sensibilidad a la fuerza residual [10]

Este interruptor ha sido diseñado de tal manera que se tenga un bajo voltaje de actuación y un proceso de fabricación efectivo. El diseño está montado sobre una línea de transmisión CPW y la membrana esta soportada por cuatro resortes. Cada resorte está conectado a un anclaje, en medio de la línea. Se pudo reducir la resistencia de la fuerza residual de las vigas, usando una forma de serpentina en cada una de las líneas que soportan a la membrana principal. El electrodo de actuación está debajo de la membrana de contacto. Los resultados de la simulación mostraron que sólo ocurre la deformación en los resortes. El voltaje de actuación simulado fue de 14 [V] con una membrana de dimensiones de 200x80 μm .

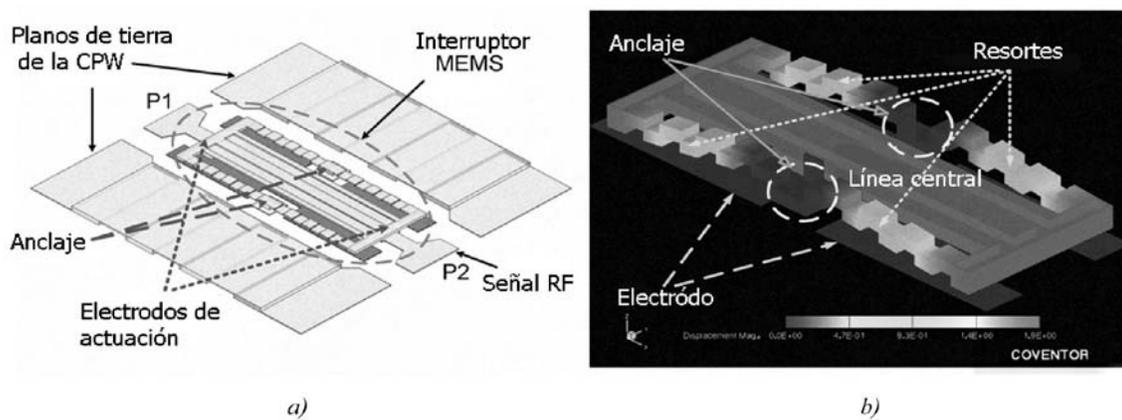


Figura 2.12. a) Esquema del interruptor. b) Simulación del interruptor usando el programa CoventorWare.

También podemos observar en la figura 2.12(b), como las vigas individuales que soportan la línea central, tienen una forma escalonada y esto también es para reducir aún más la fuerza residual, ya que se reduce considerablemente la constante de resorte de cada viga, a diferencia de la línea central.

Tabla 2.5. Características del Interruptor

	Voltaje de Actuación [V]	Pérdidas de inserción [dB]	Aislamiento [dB]	Frecuencia [GHz]	Sustrato
Interruptor con bajo voltaje de actuación y baja sensibilidad a la fuerza residual	20	-0.15	30	@ 40	Alúmina

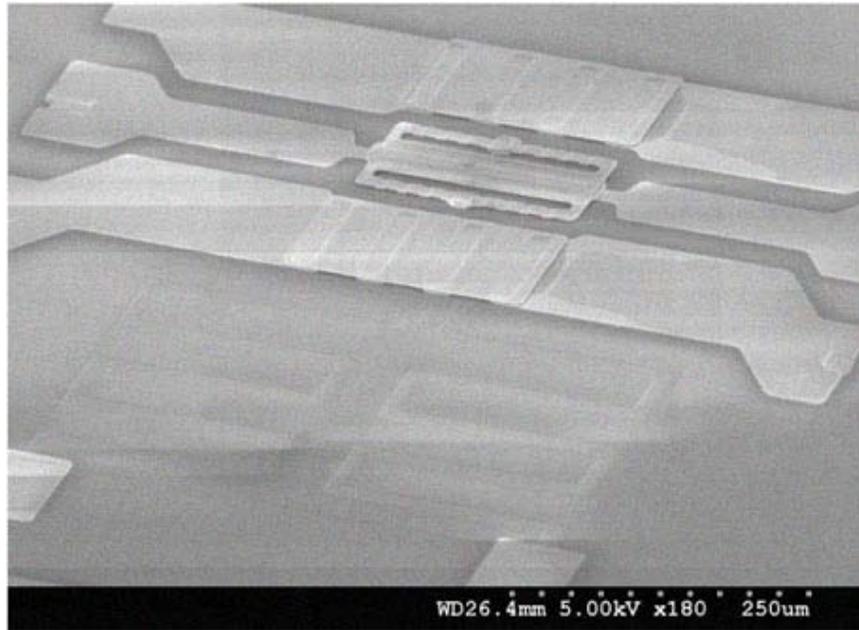


Figura 2.13. Fotografía SEM del interruptor ya fabricado.

El interruptor, ya fabricado, muestra una respuesta entre -0.7 a -0.4 dB para las pérdidas de inserción, en un rango de 5 a 40 GHz y -60 a -30 dB de aislamiento de DC a 40 GHz, con un voltaje de actuación de 20 [V], sobre un sustrato de alúmina que tiene una constante dieléctrica ϵ de 9.9. Este interruptor fue desarrollado por la Universidad de Waterloo, Canadá.

2.6 Conclusiones

Como podemos ver, en cada interruptor diseñado y fabricado actualmente, el principal aspecto a optimizar, es la reducción el voltaje de actuación. Los diferentes diseños en el tipo del interruptor tratan de optimizar tanto la respuesta en frecuencia como el voltaje de actuación y ya no son los mismos interruptores sencillos de hace algunos años. Con la implementación de vigas tipo serpentina, o de resorte, se puede reducir la rigidez de las membranas y con las nuevas técnicas de depósito y liberación en los procesos de fabricación, se han logrado voltajes de actuación que permiten la integración de los RF MEMS directamente en los circuitos integrados comunes. En la tabla 2.6 vemos que la mayoría de los interruptores revisados, logran buenas respuestas en frecuencia, a excepción del interruptor multiactuación [5], que no tiene ni aislamiento ni pérdidas de inserción adecuadas para el campo RF, sin embargo, la investigación continúa y se espera mejorar estos aspectos en los próximos años. Uno de los mejores diseños es el del interruptor con sistema antipegajosidad [6], el cual tiene bajo voltaje de actuación (5 [V]) y buena respuesta en frecuencia.

En la siguiente tabla podemos observar las principales características de los interruptores revisados.

Tabla 2.6 Comparación de las principales características de los interruptores

	Voltaje de Actuación [V]	Pérdidas de inserción [dB]	Aislamiento [dB]	Frecuencia [GHz]	Sustrato
Interruptor con multiactuación CMOS [5]	7	-2.5	-4.1	@ 5	Silicio de alta resistividad
Interruptor con voltaje de actuación bajo y sistema antipegajosidad [6]	5	-0.45	-30	@ 10	Silicio de alta resistividad
Interruptor con bajo voltaje de actuación y diseño inédito del contacto [7]	6.39	0.47	23	@ 40	Alúmina
Interruptor con micropuentes de carburo de silicio SiC [9]	52	0.3	-20	@ 45	Silicio de alta resistividad
Interruptor con bajo voltaje de actuación y baja sensibilidad a la fuerza residual [10]	20	-0.15	-30	@ 40	Alúmina

Otro punto interesante de la revisión de los interruptores anteriores es el hecho de que todos son de diferentes países, no estando limitados a una sola zona geográfica. Esto nos permite observar que el desarrollo de interruptores MEMS se está llevando a cabo alrededor del mundo, debido a las ventajas que esta tecnología está mostrando con respecto a otras.

Referencias

- [1] Página Electrónica <http://www.radantmems.com>.
- [2] Mendoza R. D. T., “Desarrollo de un interruptor MEMS para la banda *Ka* utilizando tecnología flexible de circuito impreso”, Capítulo Cinco, Tesis de Maestría, UNAM, México, 2007.
- [3] Maluf, N. Williams, K., “An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering”, 2nd Edition, 2004, Artech House Inc.
- [4] Chen, J., Yuehua, Y, “Laser microfabrication in RF MEMS Switches”, 13th Symposium on Antenna Technology and applied electromagnetics and the Canadian Radio Sciences Meeting, pp 1-5, febrero de 2009.
- [5] Lee, C, Ko, C. y Huang T., “Design of Multi-actuation RF MEMS Switch Using CMOS Process”, Microsystems, Packaging, Assembly & Circuits Technology Conference, pp 141-144, octubre de 2008.
- [6] Touati, S., Lorphelin, N., Kancierzewski, A., Robin, R., Rollier, A., Millet, O., Segueni, K., “Low actuation voltage totally free flexible RF MEMS switch with antistiction system”, Symposium de Diseño, pruebas, integración y empaque de MEMS/MOEMS, pp. 66-70, abril de 2008.
- [7] Rahman, H., Hesketh, T., Ramer, R., ‘Low actuation voltage RF MEMS series switch with novel beam design’, Conferencia de Tecnologías Emergentes, pp. 116-119, octubre de 2008.
- [8] Pozar, David M. “Microwave engineering”, 3ª Edición, Wiley & Sons, EUA, 2005.
- [9] Scardelletti, M., Zorman, C., Oldham, D., “RF MEMS switches with SiC microbridges for improved reliability”, Antennas and Propagation Society International Symposium, IEEE, pp. 1-4, julio de 2008.
- [10] Chan K., Ramer, R. “RF MEMS Switch with Low Stress Sensitivity and Low Actuation Voltage”, Antennas and Propagation Society International Symposium, 2009. IEEE, pp. 1-4 Junio 2009.