

Capítulo 1. Aspectos generales de los interruptores RF MEMS

Posiblemente, el componente más usado de los MEMS de radiofrecuencia (RF), es el interruptor o conmutador. Los interruptores así como los relevadores, son simples, pero vitales para los componentes automatizados. La acción que realiza el interruptor, es unir o separar circuitos, con el fin de permitir o no, el paso de señales a través de diferentes componentes. En medición y pruebas, la acción de interrumpir puede minimizar los instrumentos y simplificar el sistema de pruebas.

Una definición fundamental para tal componente es: *Un interruptor es un dispositivo para abrir o cerrar un circuito.* Aunque suene simple interrumpir un circuito, o romper una línea de conducción, los análisis de procesos de interrupción son todo menos simples y estos análisis se complican a frecuencias altas. Un interruptor de señal de RF, puede introducir efectos resistivos y capacitivos en circuitos de señal a señal, o señal a tierra. Como su funcionamiento es mecánico, tienen cierto periodo de vida y están propensos a fallar. El tiempo que se tarda en cerrar o abrir un interruptor, es la limitante en diversas aplicaciones de RF. Este intervalo de tiempo es del orden de milisegundos a unos tantos cientos de nanosegundos. Un interruptor RF puede ser usado para controlar tanto una antena, como un transmisor y un receptor. [1]

Es importante mencionar, que un interruptor RF es más que solo una serie de conexiones de diodos o circuitos integrados. Es una parte integral de un sistema de RF. Una selección adecuada de un interruptor RF puede hacer la diferencia entre un rendimiento óptimo y el alcance de los objetivos planeados.

Los interruptores RF MEMS son dispositivos utilizados en alta frecuencia, con el fin de permitir el paso o no, de una señal de RF. Existe una gran variedad de estos dispositivos, que pueden ser, interruptores serie, paralelo, de contacto y capacitivos.

1.1 Parámetros importantes de los interruptores MEMS

La energía eléctrica es transportada por conducción a través de alambres o cables conductores. En un circuito simple, las partes principales son una fuente de energía eléctrica, una carga o un dispositivo de salida y un circuito cerrado por donde pueda fluir la corriente. Si alguno de los requerimientos no es completado, no fluye corriente eléctrica. Los parámetros que se tienen que considerar en el diseño de interruptores RF, son (a) pérdidas de inserción; (b) aislamiento; (c) voltaje de actuación; (d) tiempo de conmutación; (e) acoplamiento de impedancia; (f) ancho de banda; (g) resistencia serie; (h) frecuencia de resonancia; entre otras, sin embargo, los anteriores se consideran los más importantes.

A continuación se describen aspectos relacionados de los parámetros enlistados.

1.1.1 Pérdidas de inserción

Las pérdidas de inserción de un dispositivo RF son la medida de la eficiencia de la transmisión de la señal. En el caso de un interruptor, las pérdidas de inserción se especifican sólo cuando el estado es tal que la señal es transmitida o cuando el interruptor está *encendido*. Se especifica en términos del coeficiente de transmisión, S_{21} , [2] en decibeles, entre la entrada y la salida del circuito cuando está encendido. Uno de los objetivos principales para la mayoría de los interruptores RF es reducir las pérdidas de inserción. Las pérdidas de inserción aumentan con el incremento de la frecuencia en la mayoría de los sistemas de estado sólido. Comparados con los semiconductores, los interruptores RF MEMS pueden ser diseñados para operar con pérdidas de inserción mínimas, a frecuencias del orden de los gigahertz. Pérdidas resistivas a bajas frecuencias y efecto piel a altas frecuencias son la mayor causa de pérdidas.

1.1.2 Aislamiento

El aislamiento de un sistema de interrupción se especifica cuando no hay señal de transmisión. También se mide con el parámetro de dispersión S_{21} entre la entrada y la salida del circuito, bajo el estado de no transmisión o cuando el interruptor se encuentra en estado *apagado*. Un valor mayor (en decibeles) indica un acoplamiento muy bajo entre las entradas y la salida. Así que el objetivo del diseño es maximizar el aislamiento. En los RF MEMS, el aislamiento puede degradarse como resultado de la proximidad entre la parte móvil y la línea de transmisión dando como resultado corrientes de fuga.

1.1.3 Voltaje de actuación

Todos los sistemas automatizados requieren una señal para controlar el actuador. Dependiendo del esquema y su eficiencia, estos voltajes varían significativamente. Aunque éste no es un problema para los sistemas basados en semiconductores, uno de los objetivos de diseño del estado de arte de los microsistemas electromecánicos es reducir esos voltajes para hacerlos compatibles con el resto del circuito.

1.1.4 Tiempo de conmutación

El tiempo de conmutación es la medida de la velocidad en la que la posición de un interruptor puede cambiar de estado abierto a estado cerrado. Se define como el tiempo requerido para que la señal de salida aumente su valor del 10% al 90% para una transición apagado-encendido y para que reduzca su valor del 90% al 10% en la transición encendido-apagado.

1.1.5 Acoplamiento de Impedancia

Es un elemento crítico de cualquier diseño en alta frecuencia. El dispositivo interruptor debe estar *acoplado* tanto a la entrada como a la salida, así como en cualquier estado, abierto o cerrado, para reducir el impacto que se pueda tener en el desempeño total del resto del sistema. Un componente mal acoplado puede causar efectos no deseados y afectar el funcionamiento de otros sistemas. Aunque un acoplamiento ideal casi nunca se obtiene, se puede lograr e incluso minimizar los efectos dentro de límites aceptables.

1.1.6 Ancho de banda

La mayoría de interruptores no tienen límite en las frecuencias bajas de operación, aunque si lo tienen en los límites superiores. Para los componentes semiconductores, su ancho de banda se debe al tiempo finito de movilidad de los portadores [3]. Las pérdidas ocasionadas por resistencias y reactancias parásitas son la causa principal para limitar el rendimiento de los interruptores electromecánicos a altas frecuencias.

1.1.7 Resistencia serie

En muchos casos el interruptor está conectado en serie con la línea de transmisión. Cualquier resistencia que se presente en el interruptor durante la transmisión de la señal (estado encendido) puede terminar como pérdida de la señal. Una forma de representar esto, en especial a bajas frecuencias, es usar una resistencia en serie del interruptor mientras está conduciendo. En altas frecuencias, esto se representa como pérdidas de inserción.

1.1.8 Frecuencia de resonancia

Las partes móviles de los interruptores mecánicos tienen frecuencias de resonancia que pueden ser modeladas en términos de las constantes de resorte así como de la masa. Esta frecuencia limita la tasa máxima a la que el interruptor puede cambiar, pero virtualmente no repercute en la frecuencia de las señales RF que el interruptor “transporta”.

En circuitos eléctricos, la resonancia ocurre cuando la energía almacenada en un inductor es igual a la energía eléctrica almacenada en un capacitor. En un circuito resonante, cuando se está en resonancia serie, la corriente será máxima, ofreciendo una impedancia mínima y viceversa en resonancia paralela.

1.2 Mecanismo de actuación de los Interruptores MEMS

Los avances en micro y nano técnicas influenciaron el entorno de los MEMS. En fechas recientes, un microsistema electromecánico ha sido definido como un dispositivo miniatura o un arreglo combinado de componentes eléctricos y mecánicos, fabricados con tecnologías de circuitos integrados [4]. Existen diferentes tipos de fabricación que no abordaremos, sino solo comentaremos.

En un circuito de RF, los dispositivos interruptores como los transistores bipolares de unión (BJT) o los transistores de efecto de campo (FET) pueden ser reemplazados con dispositivos MEMS, así como también es posible usar un dispositivo MEMS para *enrutar* la señal de RF entre diferentes líneas de transmisión. Sin embargo, en la mayoría de los circuitos de RF, la consideración más importante es la presencia de elementos reactivos porque cada uno tiene su función específica. Los circuitos de mecanismo y actuación no tienen que cargar al circuito y la señal DC tiene que ser aislada de la señal RF. A continuación se hace una breve descripción de los actuadores más usados.

1.2.1 Actuador electrostático

La actuación electrostática es la conversión electromecánica de energía más usada en los micro sistemas electromecánicos (MEMS). Es el ejemplo típico de un transductor de almacenamiento de energía. Tales transductores almacenan energía cuando se realiza un trabajo mecánico o eléctrico. Asumiendo que el dispositivo no tiene pérdidas, esta energía almacenada es convertida después en otra forma de energía.

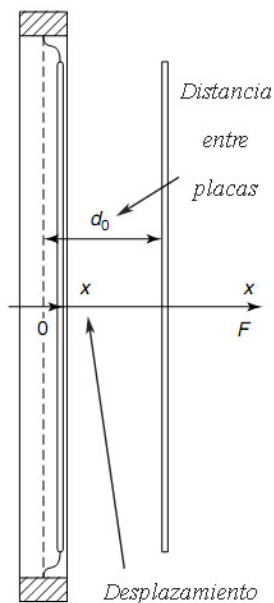


Figura 1.1. Actuador electrostático.

La estructura de este tipo de transductor por lo regular consiste de un arreglo capacitivo, donde una de las placas es móvil debido a la aplicación de un voltaje de polarización. Esto produce un desplazamiento, que es una forma mecánica de energía. Como se puede observar en la figura 1.1, cuando se aplica un campo eléctrico entre las placas, la distancia d_0 se reduce $d_0 - x$, provocado por una fuerza F resultante de la aplicación del campo eléctrico. Éste es el método que se utilizó en el interruptor diseñado y se verá en el capítulo 3 con más detalle.

1.2.2 Actuador térmico

En los interruptores con actuador térmico, el calor es aplicado en una línea que se expande dependiendo de la cantidad de calor, este movimiento mecánico es usado como actuador. Se logran deflexiones grandes usando este método, pero los actuadores electrotérmicos son lentos para las frecuencias que nos interesan [5].

Un dispositivo que utiliza este principio es el mostrado en la figura 1.2. Consiste en dos diafragmas aislados, que tiene dos resistores funcionando como actuador y sensor. El elemento calefactor R_H está conectado a una fuente de corriente I_H el calor generado por R_H es modulado por el voltaje de entrada. El cambio en la resistencia del sensor es proporcional al cambio en la temperatura ΔT y resulta en una correspondiente variación del voltaje de salida [6]. El diafragma es el que se encargará de interrumpir la señal de RF.

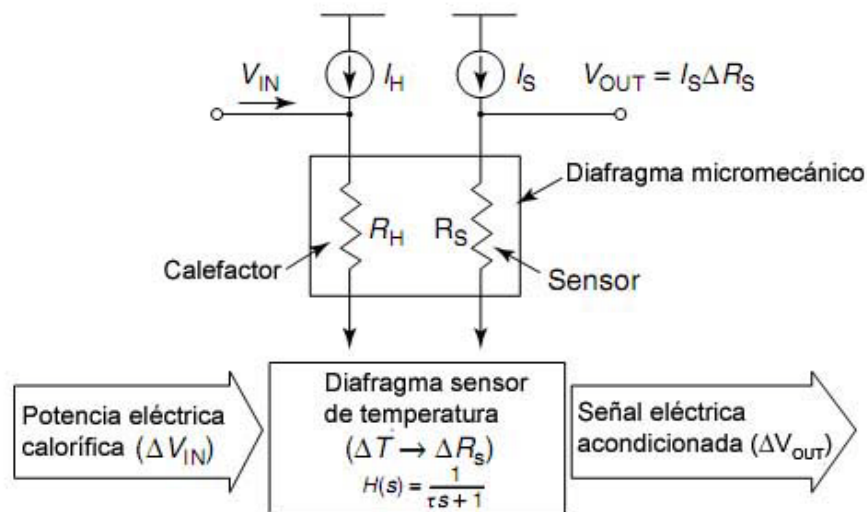


Figura 1.2. Actuador electrotérmico.

1.2.3 Actuador electromagnético

Este es un transductor de almacenamiento de energía, que se diferencia del anterior, en que la energía es magnética y mecánica. Un diagrama simplificado de este tipo de transductores se muestra en la figura 1.3. Cuando una corriente fluye a través de la bobina, se tiene un flujo magnético ϕ . La conversión de energía toma lugar de la interacción entre la corriente i , la fuerza F y el desplazamiento x .

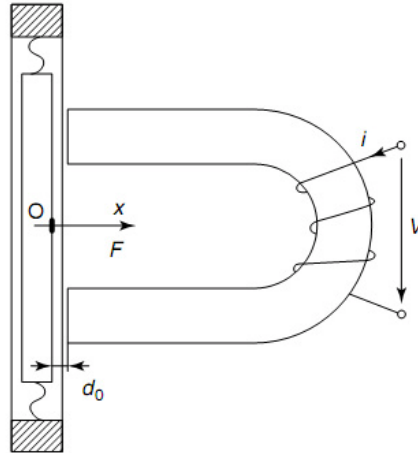


Figura 1.3. Actuador electromagnético.

La miniaturización de un actuador de este tipo, requiere la fabricación de películas delgadas y bobinas muy pequeñas. Se han hecho algunos diseños para realizar este tipo de dispositivos, pero el tamaño aún no es el adecuado para los fines de RF. También se tiene el problema de aislar magnéticamente los campos adyacentes de los dispositivos cercanos, lo que hace la integración de estos dispositivos, todo un reto [7].

1.2.4. Actuador piezoeléctrico

Cuando se someten a una fuerza mecánica, ciertos materiales cristalinos generan carga. Este fenómeno fue descubierto en 1880 por Jaques y Pierre Curie y se conoce como piezoelectricidad. Este fenómeno también puede ser a la inversa, ya que ciertos materiales piezoeléctricos, pueden presentar una deformación si se les aplica un voltaje. Uno de estos materiales es el Zirconato Titanato de Plomo (PZT).

Si en el momento de la fabricación no se aplica una diferencia de potencial, los cristales del PZT tienen dominios orientados al azar. Si se aplica una fuerza externa, se presentan pequeños cambios en el momento del dipolo. Sin embargo, si el material es sujeto a un campo eléctrico durante el proceso de fabricación, esos cristales se alinean en la dirección del campo. Cuando se aplica una fuerza al material, los arreglos o redes cristalinas se distorsionan provocando cambios en los dominios y una variación de la distribución de la carga dentro del material. El efecto inverso de producir una deformación mecánica es provocado cuando esos dominios cambian de forma por la aplicación de un campo eléctrico [5].

Esta propiedad es usada para construir actuadores y aunque se requiere un bajo voltaje de actuación, generalmente se obtiene una eficiencia electromecánica baja, debido a las técnicas de fabricación. En la figura 1.4 vemos el diagrama de un actuador piezoeléctrico en el cual, cuando se aplica un voltaje, el disco se expande una longitud ΔL en la dirección y y se contrae ΔD en la dirección x .

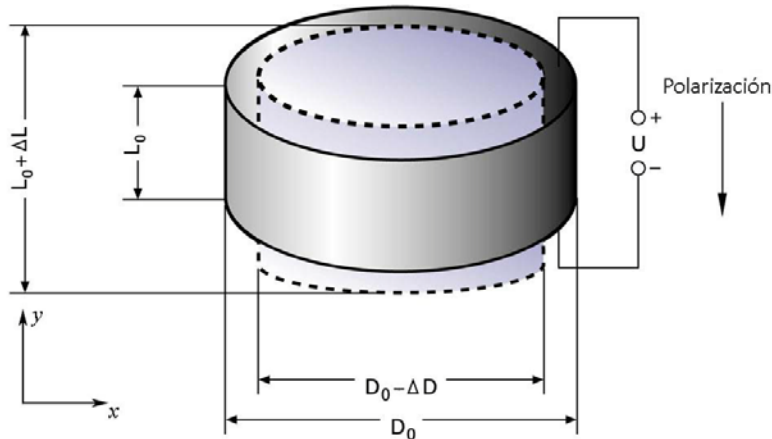


Figura 1.4. Expansión y contracción de un disco piezoeléctrico en respuesta a un voltaje aplicado [8].

El actuador del interruptor puede ser, como hemos revisado, electrostático, magnético o electromagnético, térmico y piezoeléctrico; cada uno tiene ventajas y desventajas. La ventaja de un actuador electrostático es que no hay consumo de potencia; la desventaja es que requiere un voltaje de actuación muy alto, del orden de 5 a 100 V. La ventaja de un actuador electromagnético, es su bajo voltaje de actuación, pero, tiene un alto consumo de potencia. Los interruptores electrostáticos ofrecen la configuración más viable debido a su bajo consumo de potencia. Las diferentes características de los mecanismos de actuación aparecen en la tabla 1.1.

TABLA 1.1 Configuraciones de dispositivos MEMS

Mecanismo de actuación	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Tamaño	Tasa de conmutación (μs)	Fuerza de contacto (μN)
Electrostático	20-80	0	0	pequeño	1-200	50-1000
Térmico	3-5	5-100	0-200	grande	200-10000	500-4000
Electromagnético	3-5	20-150	0-100	mediano	200-1000	50-200
Piezoeléctrico	3-20	0	0	mediano	50-500	50-200

1.3 Configuración eléctrica de los interruptores MEMS

Existen dos configuraciones básicas para los RF MEMS: serie y paralelo. Ambos usan las características únicas de cómo están contruidos, ya sea por cantiléver (viga voladiza) o tipo capacitivo (*shunt*).

1.3.1 Interruptor con contacto serie

Como se ve en la figura 1.5, el interruptor serie abre totalmente la línea de transmisión y es necesario cerrarlo para que la señal fluya de la entrada a la salida. Este tipo de interruptor es adecuado para bajas frecuencias y los interruptores tipo cantiléver son los que usan este diseño. La mayoría de RF MEMS serie usan contacto metal-metal. Este tipo de interruptores son implementados en las líneas de transmisión tipo microcinta (*microstripline*) [2]. W es el ancho del electrodo de actuación, w es el ancho del dieléctrico y g_0 es la distancia entre el electrodo de actuación y la viga.

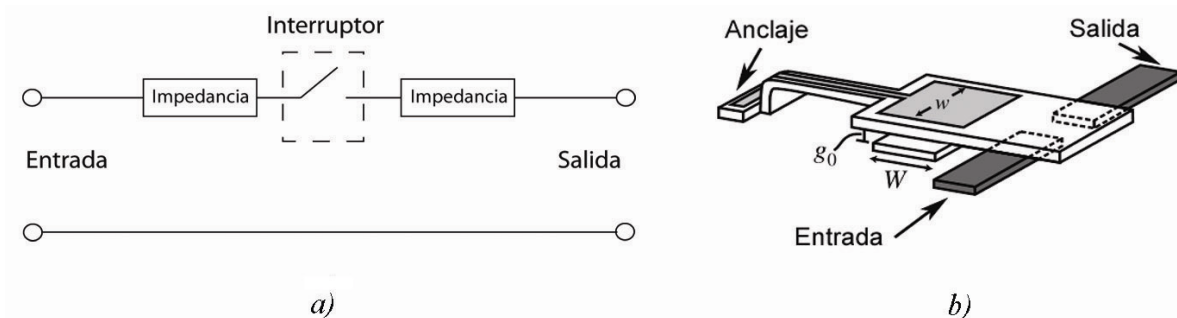


Figura 1.5. Interruptor de viga voladiza. a) Diagrama eléctrico. b) Diagrama mecánico.

1.3.2 Interruptor con contacto paralelo

Este tipo de interruptores son implementados con un diseño tipo puente. Su funcionamiento se basa en que dejan pasar la señal cuando la membrana esta encima de la línea de transmisión. En esta posición el interruptor está *apagado* y cuando la membrana esta encima de la línea central está *encendido* y la señal es bloqueada, mandándola a tierra. Aunque es el más usado, este interruptor no tiene una buena respuesta para bajas frecuencias, pero, como su fabricación es sencilla, es uno de los diseños preferidos en los RF MEMS. Su funcionamiento es similar a un capacitor variable (Figura 1.6). Este tipo de interruptores se implementan fácilmente en las líneas de transmisión de guías de onda coplanares (CPW) [9].

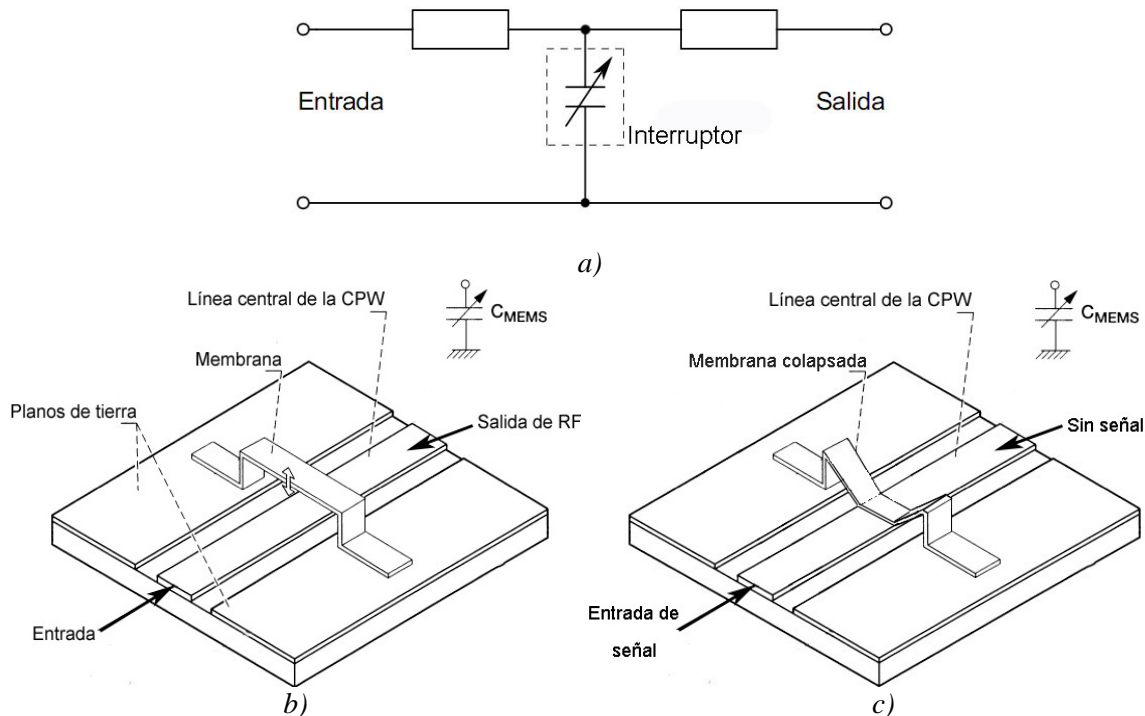


Figura 1.6. Interruptor paralelo. a) Diagrama Eléctrico. b) Diagrama de un interruptor en una CPW, con la membrana suspendida sobre la línea central y, c) la misma membrana colapsada.

1.4 Actuación electrostática

Como vimos en los diversos tipos de actuadores, la actuación electrostática utiliza la conversión de energía electromecánica y la transducción es por medio de almacenamiento de energía. La estructura de este tipo de transductor consiste de un arreglo capacitivo, cuando el contacto no es metal contra metal, sino con un dieléctrico entre ellos, donde una de las placas es movida cuando se le aplica un voltaje de ajuste.

Cuando se aplica un voltaje entre una línea flotante (cantiléver o membrana tipo puente) y un electrodo de actuación, se induce un campo electrostático en la línea. Este campo genera una fuerza que a su vez, produce un desplazamiento mecánico de la línea flotante.

Esta es la fuerza característica que se produce en un capacitor cuando se le aplica un voltaje. Para poder aproximar esta fuerza, es necesario modelar el electrodo y la línea como un capacitor de placas paralelas. Este modelo es una buena aproximación [10].

En la figura 1.7, dado el ancho de la línea flotante w , el ancho del electrodo de actuación W y el área $A = Ww$, la capacitancia de las placas es:

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{g} = \frac{\epsilon_0 Ww}{g} \quad (1.1)$$

Donde g es la altura de la viga encima del electrodo. La fuerza electrostática F_e aplicada a la viga es la misma considerando la potencia entregada a una capacitancia dependiente del tiempo y la expresión está dada por [11]:

$$F_e = \frac{1}{2} V^2 \frac{dC(g)}{dg} = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 Ww V^2}{g^2} \quad (1.2)$$

Donde V es el voltaje aplicado entre el electrodo y la línea. Hay que notar que la capa de dieléctrico, t_d , no se toma en cuenta en la ecuación anterior, aunque veremos más adelante que el resultado es similar con o sin el espesor de la capa del dieléctrico.

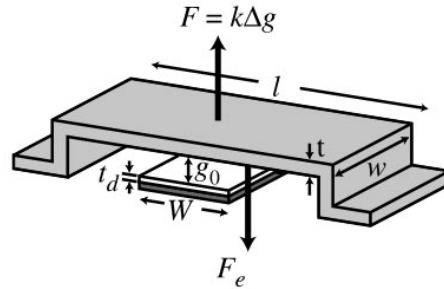


Figura 1.7. Estructura tipo puente mostrando la fuerza mecánica F y la fuerza eléctrica F_e .

La fuerza electrostática se aproxima como uniformemente distribuida en la sección donde se intersectan la membrana y el electrodo. Existen diseños en los que la fuerza aplicada está concentrada a lo largo, en medio o en un extremo de la línea. Para el caso de un puente como el de la figura 1.7, la constante de resorte asociada con el desplazamiento, está en el centro de la línea y no debajo del punto de la fuerza aplicada. Si igualamos la fuerza electrostática con la fuerza mecánica restauradora provocada por la dureza del material del puente, $F = kx$, tenemos la siguiente igualdad

$$\frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 Ww V^2}{g^2} = k(g_0 - g) \quad (1.3)$$

donde g_0 es la distancia inicial entre el electrodo inferior y la membrana, k es la constante de resorte de la membrana y $x = g_0 - g$. Despejando el voltaje de la ecuación anterior, tenemos:

$$V = \sqrt{\frac{2k}{\epsilon_0 Ww} g^2 (g_0 - g)} \quad (1.4)$$

La grafica de la altura de la línea (Altura del *gap*) contra el voltaje aplicado, muestra dos posibles posiciones para cada voltaje aplicado. Esto resulta en una posición inestable en $(2/3)g_0$, debido a la realimentación positiva en la actuación electrostática. Esto puede ser visto considerando la fuerza electrostática en términos del campo eléctrico aplicado en la línea

$$F_e = \frac{QE}{2} \quad (1.5)$$

donde Q es la carga en la línea y $E = V/g$ es el campo eléctrico debido al voltaje aplicado.

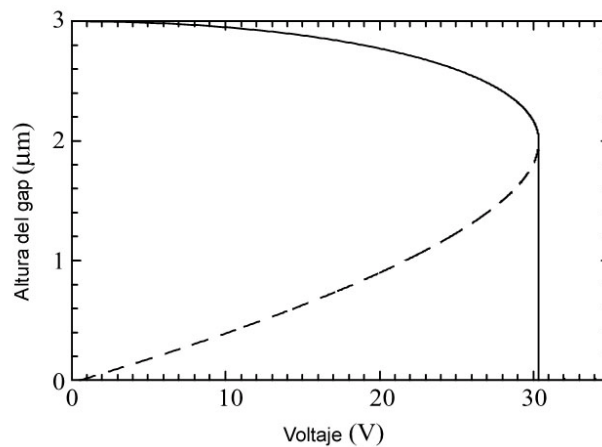


Figura 1.8. Altura de la línea contra el voltaje aplicado con un ancho $W = 100 \mu\text{m}$, $w = 100 \mu\text{m}$, $g_0 = 3 \mu\text{m}$ y $k = 10 \text{ N/m}$. El voltaje de jale, V_p es 30 V. La línea punteada representa la parte inestable de la altura.

Si se incrementa el voltaje de la fuente, la fuerza también se incrementa debido al aumento en la carga. Al mismo tiempo que la fuerza aumenta, se reduce la altura de la línea, que a su vez modifica la capacitancia y por lo tanto, la carga y el campo eléctrico aumentan. A $(2/3)g_0$, el aumento en la fuerza electrostática es mayor que el incremento en la fuerza restauradora, resultando en que la posición de la línea sea inestable y se colapse a la posición de *encendido*. Las ecuaciones (1.3) y (1.4) sirven tanto para líneas cantiléver como fijas [10].

Derivando la ecuación (1.4) con respecto a la altura g e igualándola a cero, la altura a la cual la inestabilidad ocurre, es exactamente a dos tercios de la altura de la línea. Sustituyendo este valor en la ecuación (1.4), tenemos que el voltaje de jale o actuación, V_p (Voltaje *pull-down*) es:

$$V_p = V\left(\frac{2}{3}g_0\right) = \sqrt{\frac{8k}{27\varepsilon_0 W w}} g_0^3 \quad (1.6)$$

Esta ecuación muestra dependencia del ancho de la línea w , sin embargo, el voltaje de jale, V_p , es independiente de éste, debido a que la constante k , varía linealmente con el ancho w .

La figura 1.9 muestra el voltaje de jale, V_p , calculado para un puente de oro, con fuerza residual σ de 0, 30, y 60 [MPa], usando las ecuaciones anteriores. Un voltaje de jale similar es el que se obtiene para líneas de aluminio, ya que se tienen valores similares de la constante. Para las líneas cantiléver, se logran constantes de resorte k , mucho menores, debido a la proporción t/l , espesor entre longitud de la membrana y por lo tanto, el voltaje de jale es menor.

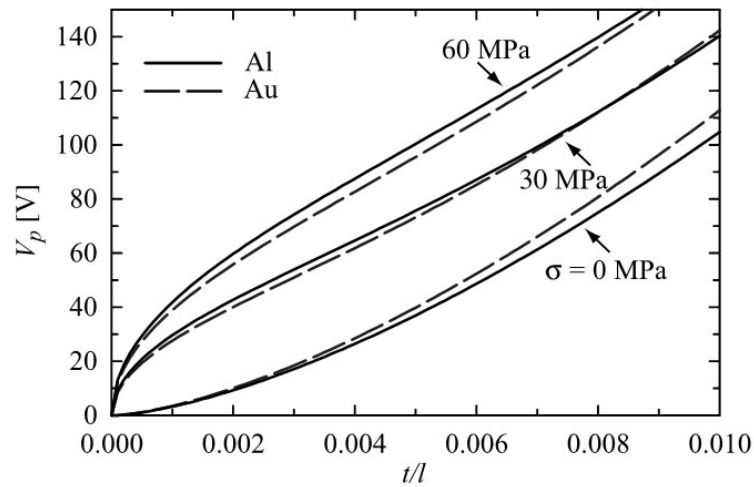


Figura 1.9. Voltaje de Jale, V_p contra la relación t/l de oro y aluminio en una estructura tipo puente, como el de la figura 1.7.

1.5 Conclusiones

Los interruptores RF MEMS tienen diferentes parámetros a considerar, así como el mecanismo de actuación. Existen diferentes tipos de actuación y comparando los diferentes mecanismos, el más adecuado para trabajar en RF es el actuador electrostático, por las características que se discutirán en los siguientes capítulos. No tiene consumo de potencia, pero la velocidad de conmutación es lenta, comparada con los actuadores térmico y magnético, pero tiene una fuerza de contacto mayor que el actuador piezoeléctrico. El estado del arte de los RF MEMS ha logrado disminuir el voltaje de actuación, para poder integrarlos directamente con circuitos integrados tipo TTL o CMOS y justamente esa es la meta final.

Los RF MEMS electrostáticos, son implementados sobre una línea de transmisión en paralelo o en viga voladiza (cantiléver). Observamos que el voltaje de jale, V_P , no tiene proporción lineal con la proporción espesor-longitud de la línea, t/l y que cada material tiene su curva característica, por lo que es necesario escoger de manera cuidadosa el material a utilizar en un dispositivo RF MEMS y asegurar un funcionamiento adecuado, dependiendo de la aplicación a implementar.

La ventaja que tienen los RF MEMS sobre dispositivos semiconductores es que tienen mejor linealidad en altas frecuencias.

Referencias

- [1] De los Santos, H., "RF MEMS circuit design for wireless communications", Artech House, EUA, 2002.
- [2] Pozar, David M. "Microwave engineering", 3ª Edición, Wiley & Sons, EUA, 2005, pp 137.
- [3] Neamen, D. "Semiconductor physics and devices, basic principles", 3ª Edición, McGraw Hill, 2003.
- [4] Bryzek, Peterson, K., McCulley, W., 1994, "Micromachines on the march", IEEE Spectrum (May), pp 20–31.
- [5] Varadan, Vinoy y José, "RF MEMS and their applications", 1ª Edición, Wiley & Sons Inglaterra, 2003, pp 18, 33.
- [6] H.K. Lee, I.J. Cho, J.U. Bu and E. Yoon, 2000, "An audio frequency filter application of micromachined thermally-isolated diaphragm structures", 13th Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS 2000, IEEE, Washington, DC.
- [7] Cancino A. L., Noriega S. E., "Diseño y simulación de un interruptor MEMS magnetostático para aplicaciones en alta frecuencia", Tesis de Licenciatura, UNAM, México 2006.
- [8] Physik Instrumente, "Piezoelectrics in Positioning, Tutorial on Piezotechnology in Nanopositioning Applications", Catalogo de información PI, 2008.
- [9] Simons, Rainee, "Coplanar Waveguide Circuits, Components and Systems" Wiley & Sons, EUA, 2001
- [10] Rebeiz, Gabriel, "RF MEMS Theory, Design and Technology", Wiley & Sons, EUA, 2003, pp 36-38.
- [11] Zahn, M, "Electromagnetic Field Theory", Wiley, 1979, EUA, p. 219.