

# Conmutadores RF-MEMS de baja tensión

Adrián Contreras<sup>(1)</sup>, Jasmina Casals-Terré<sup>(2)</sup>, Lluís Pradell<sup>(1)</sup>, Flavio Giacomozzi<sup>(3)</sup>, Sabrina Colpo<sup>(3)</sup>,  
Jacopo Iannacci<sup>(3)</sup>, Miquel Ribó<sup>(4)</sup>

acontrer@ieee.org, jasmina.casals@upc.edu, pradell@upc.edu

<sup>(1)</sup> Teoria del Senyal i Comunicacions, Universitat Politècnica de Catalunya, Jordi Girona 31, 08034, Barcelona.

<sup>(2)</sup> Enginyeria Mecànica, Universitat Politècnica de Catalunya, Colom 7-11, 08028, Terrasa.

<sup>(3)</sup> Fondazione Bruno Kessler (FBK), Via Sommarive 18, Povo, Trento, Italia.

<sup>(4)</sup> Departament de Enginyeria - La Salle - Universitat Ramon Llull (URL), - Pg. Bonanova 8 - 08022 Barcelona.

**Abstract**—This work shows experimental results of capacitive and ohmic RF-MEMS switches with low actuation voltage. The isolation of capacitive switches is better than 20 dB from 15 GHz and up to 80 GHz according to simulations. The ohmic-contact switch can be used in coplanar waveguide (CPW) reconfigurable multimodal circuits, for a selective use of the CPW odd-mode. The CPW odd-mode isolation in the down state is better than 20 dB up to 8 GHz and better than 10 dB up to 30 GHz.

## I. INTRODUCCIÓN

Los dispositivos RF-MEMS electrostáticos han demostrado unas excelentes prestaciones en términos de linealidad, pérdidas y consumo de energía [1]. Sin embargo, una desventaja de estos dispositivos es su alta tensión de actuación ( $V_{pi}$ ), que puede ser estimada por

$$V_{pi} = \sqrt{\frac{8kg_0^3}{27A\epsilon_0}}, \quad (1)$$

donde  $k$  es la constante elástica de la suspensión del dispositivo,  $\epsilon_0$  es la permitividad del vacío,  $g_0$  es la separación entre electrodos y  $A$  es el área de los electrodos. Es posible obtener una  $V_{pi}$  menor reduciendo la rigidez de las suspensiones [2]. Sin embargo, se corre el riesgo de minimizar la fiabilidad del dispositivo, debido a que está directamente relacionada con la fuerza de recuperación, definida por

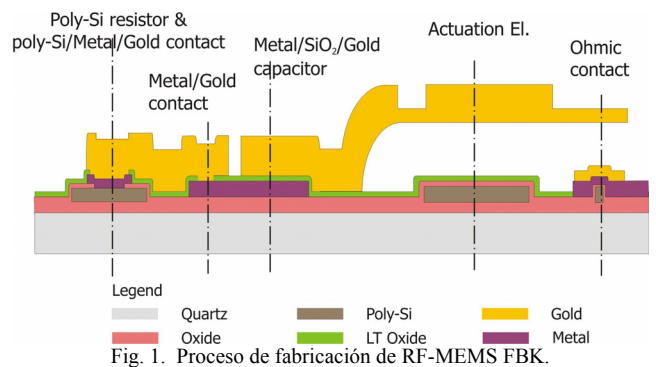
$$F_r = kg_0. \quad (2)$$

Una segunda opción es reducir la distancia entre los electrodos [3], manteniendo una constante de elasticidad adecuada. En este trabajo se muestran conmutadores capacitivos y óhmicos de baja tensión de actuación con diferentes separaciones  $g_0$  entre electrodos. La membrana de ambos dispositivos está compuesta por dos capas de oro, una de ellas utilizada para reforzar la estructura haciéndola menos susceptible a gradientes de estrés derivados del proceso de fabricación. La membrana está anclada por medio de suspensiones en meandro [4], que tienen como objetivo reducir la constante de elasticidad del dispositivo. El conmutador óhmico propuesto en este trabajo fue diseñado con el objetivo de cortocircuitar el modo impar en una guía de onda coplanar (CPW) y puede utilizarse en circuitos

multimodales reconfigurables [5]-[7]. El actuador también puede ser utilizado en líneas de transmisión uniplanares como coplanar strip (CPS) y slotline. Debido a que el conmutador óhmico está anclado por medio de suspensiones en meandro, los extremos de la membrana quedan libres para contactar los planos de masa de la CPW, asegurando un buen contacto.

## II. PROCESO DE FABRICACIÓN Y DISEÑO MECANICO

La tecnología utilizada para la fabricación de los dispositivos consiste en un proceso de micro-mecanizado de 8 mascarar, desarrollado por el grupo MEMS de FBK [8]. La Fig. 1 muestra un corte transversal que describe las capacidades estructurales del proceso. Para definir la metalización de las líneas de transmisión y membranas suspendidas, es posible depositar dos capas de oro con diferentes espesores ( $1.8 \mu\text{m}$  y  $3.5 \mu\text{m}$ ). Los electrodos y las líneas de polarización están fabricados con polisilicio de alta resistividad. Para conectar las líneas que han de pasar por debajo de las membranas suspendidas, se utiliza una capa “multimetall”, formada por la deposición de diferentes materiales (Ti/TiN/Al/Ti/TiN). Una tercera capa de oro se deposita sobre el aislante de la capa multimetall, para definir condensadores o directamente sobre el multimetall para los contactos óhmicos. En los conmutadores de este trabajo se han utilizado dos capas sacrificiales de diferente espesor,  $3 \mu\text{m}$  y  $1.6 \mu\text{m}$ .



Los conmutadores fabricados se muestran en las Fig. 2 y 3. En ambos casos se han utilizado suspensiones en meandro formadas por una sola capa de oro con un espesor de  $1.8 \mu\text{m}$  y

un ancho de  $10 \mu\text{m}$ . Se ha seleccionado este tipo de suspensión debido a que ofrece una constante de elasticidad adecuada dentro de un área reducida y además es posible compensar el estrés residual originado por el proceso de fabricación. Un marco de  $3.5 \mu\text{m}$  de espesor incrementa la rigidez de la membrana.

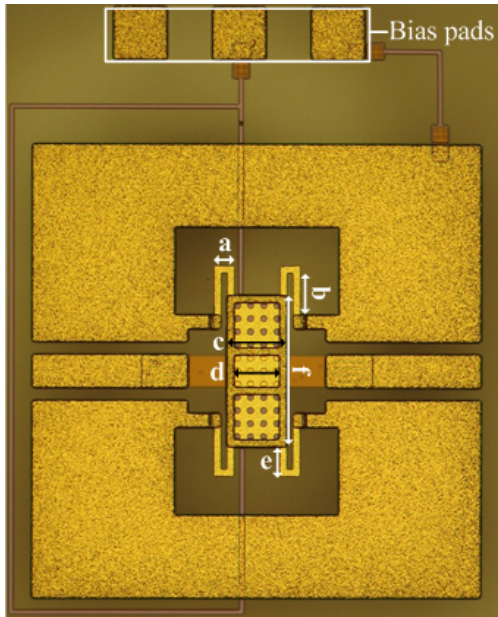


Fig. 2. Conmutador RF-MEMS capacitivo.

Cuando se aplica una tensión igual o superior al  $V_{pi}$  a los electrodos, la membrana hace contacto con la capa de  $150 \text{ nm}$  de espesor. En los actuadores capacitivos esta capa forma un condensador con un área de  $(90 \times 50) \mu\text{m}^2$ . En los dispositivos óhmicos (Fig. 3), la capa de oro de  $150 \text{ nm}$  solo está presente sobre los bordes de una línea delgada (multimetall) conectada a los planos de masa. El área de cada electrodo de polisilicio (dos por cada membrana) es  $(90 \times 85) \mu\text{m}^2$ . Las dimensiones y los parámetros mecánicos de los conmutadores propuestos se resumen en la Tabla I.

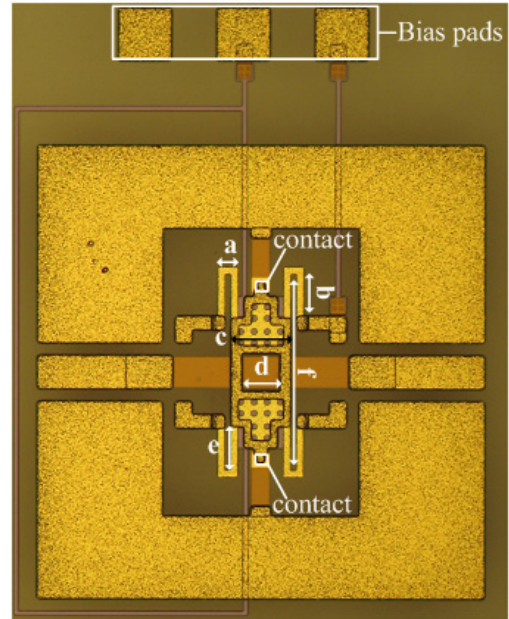


Fig. 3. Conmutador RF-MEMS óhmico.

TABLA I  
DIMENSIONES Y PARÁMETROS DE LOS CONMUTADORES

Parámetro	Capacitivo	Óhmico
	$g_0: 1.3/2.7 \mu\text{m}$	$g_0: 1.3/2.7 \mu\text{m}$
Longitud del dobléz, $a$ ( $\mu\text{m}$ )	30	30
Ancho de la suspensión ( $\mu\text{m}$ )	10	10
Largo de brazo de suspensión, $b$ ( $\mu\text{m}$ )	75	78
Longitud de brazo de suspensión, $e$ ( $\mu\text{m}$ )	45	68
Ancho de membrana, $c$ ( $\mu\text{m}$ )	90	90
Ancho de ventana, $d$ ( $\mu\text{m}$ )	70	60
Largo total de membrana, $f$ ( $\mu\text{m}$ )	230	275
Área de condensador / contacto, ( $\mu\text{m}^2$ )	$(50 \times 90)$	$(10 \times 12)$
Constante elástica*, $k$ (N/m)	16.3	13.3
Tensión de actuación ó "pull-in", $V_{pi}$ (V)	12 / 25	12 / 26
Tensión de "pull-out", $V_{po}$ (V)	5.5 / 12	8 / 21

\*Simulación de elementos finitos

En la Fig.4 se muestra la simulación electro-mecánica (ANSYS<sup>TM</sup>) para el actuador capacitivo con un  $g_0 = 1.3 \mu\text{m}$ . El  $V_{pi}$  simulado es de  $12 \text{ V}$ , y para los conmutadores óhmicos con  $g_0 = 1.3 \mu\text{m}$ , la tensión simulada es  $V_{pi} = 9 \text{ V}$ .

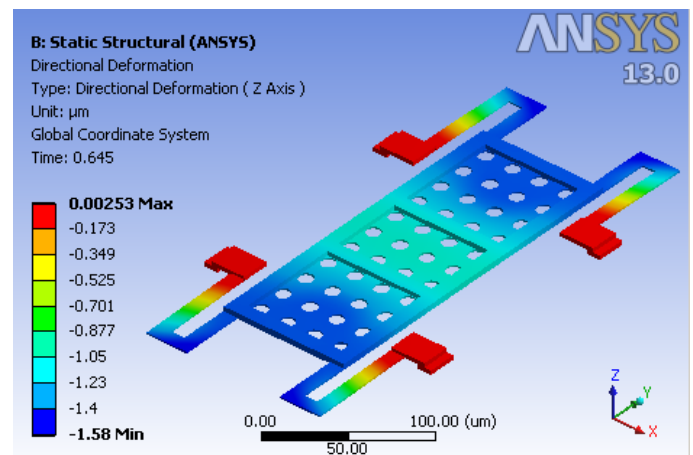


Fig. 4. Deformación del conmutador capacitivo ( $g_0 = 1.3 \mu\text{m}$ ) cuando  $V_{bias} = 12 \text{ V}$ .

### III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Debido a limitaciones establecidas por el proceso de fabricación y de medida, los actuadores se han implementado sobre una línea CPW con tramos de diferentes impedancias. Los tramos exteriores (puertos de entrada y salida) tienen separaciones entre línea de señal y masa de  $20 \mu\text{m}$ , mientras que la línea de señal tiene un ancho de  $50 \mu\text{m}$ . Estos tramos tienen impedancias características de modo par e impar  $Z_{0e1} = 65 \Omega$  y  $Z_{0o1} = 100 \Omega$ , respectivamente. La sección central de la

CPW tiene separaciones entre línea de señal y masa de  $195\mu\text{m}$ , lo que resulta en unas impedancias características  $Z_{0e2} = 135\ \Omega$  y  $Z_{0o2} = 195\ \Omega$ . Los parámetros  $S$  de la línea CPW de alta impedancia sobre la que se encuentra la membrana suspendida se obtuvieron por medio de “deembedding” de las secciones de baja impedancia.

### A. Conmutadores capacitivos

La Fig.5 muestra la curva de histéresis de capacidad-voltage (C-V) medida de los dispositivos fabricados con una capa sacrificial de  $1.6\ \mu\text{m}$ . Las tensiones de estos actuadores son  $V_{pi} = 12\ \text{V}$  y  $V_{po} = 5.5\ \text{V}$ . Para los actuadores con  $g_0 = 2.7\ \mu\text{m}$ , las tensiones medidas son  $V_{pi} = 25\ \text{V}$  y  $V_{po} = 12\ \text{V}$ .

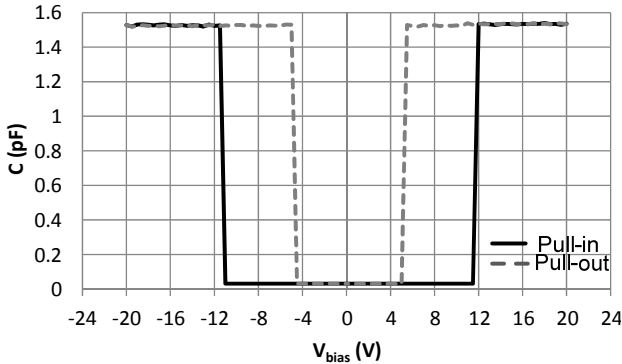


Fig.5. Curva de histéresis C-V de un conmutador capacitivo ( $g_0 = 1.3\ \mu\text{m}$ ).

Las características de RF se han medido utilizando un analizador de redes vectorial PNA-X N5245A, conectado a una estación de sondas coplanares GSG con un pitch de  $150\ \mu\text{m}$ . Después de obtener los parámetros  $S$  de la sección central de la CPW y normalizar con la impedancia correspondiente, se observa que las pérdidas de inserción en el estado “alto” son menores  $0.4\ \text{dB}$ , mientras que las pérdidas de retorno son mayores a  $20\ \text{dB}$  hasta  $50\ \text{GHz}$ . La capacidad de estado “alto” es  $C_{\text{Calto}} = 0.0305\ \text{pF}$ . La Fig.6 muestra los parámetros  $S$  medidos cuando el actuador se encuentra en el estado “bajo”. El aislamiento es mayor a  $20\ \text{dB}$  desde  $15\ \text{GHz}$  hasta  $50\ \text{GHz}$ . De acuerdo con el circuito equivalente del actuador, el aislamiento es mayor a  $30\ \text{dB}$  hasta  $80\ \text{GHz}$ .

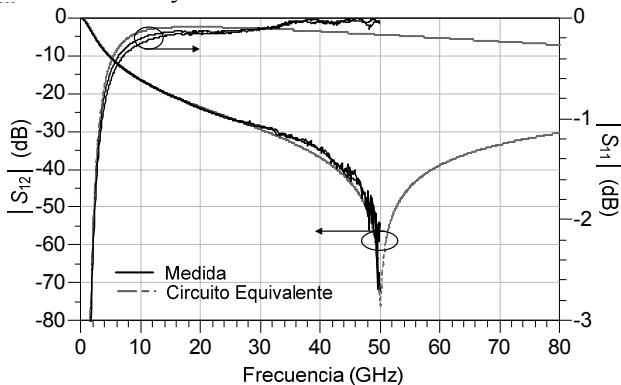


Fig. 6. Parámetros  $S$  de diferentes actuadores capacitivos ( $g_0 = 1.3\ \mu\text{m}$  y  $g_0 = 2.7\ \mu\text{m}$ ) en estado “bajo”.

La Fig.7 muestra el circuito equivalente del conmutador capacitivo en el estado “bajo”. La capacidad en este caso es  $C_{\text{Cbajo}} = 1.53\ \text{pF}$  (para  $g_0 = 1.3\ \mu\text{m}$  y  $g_0 = 2.7\ \mu\text{m}$ ). Por lo tanto la relación de capacidades es  $C_{\text{Cbajo}}/C_{\text{Calto}} = 50.16$ .

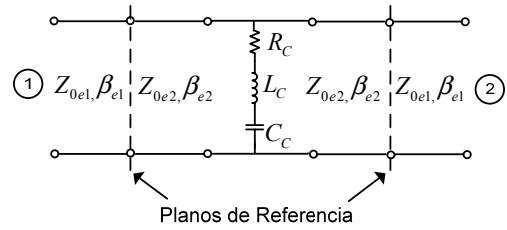


Fig. 7. Circuito equivalente del actuador capacitivo. En el estado “alto”  $R_C = 0.01\ \Omega$ ,  $L_C = 6.6\ \text{pH}$  y  $C_C = 0.0305\ \text{pF}$ . En el estado “bajo”  $R_C = 0.01\ \Omega$ ,  $L_C = 6.6\ \text{pH}$  and  $C_C = 1.53\ \text{pF}$ .  $\beta_{e1}$  y  $\beta_{e2}$  son las constantes de fase del modo CPW par.

### B. Conmutadores Óhmicos

La histéresis de los conmutadores óhmicos en paralelo se ha medido utilizando un analizador de redes vectorial, la Fig. 8 muestra los resultados para un actuador con  $g_0 = 1.3\ \mu\text{m}$ . La tensión de actuación ( $V_{pi}$ ) se establece cuando el aislamiento es mayor a  $20\ \text{dB}$  a una frecuencia de  $50\ \text{MHz}$ . Para los actuadores óhmicos con  $g_0 = 1.3\ \mu\text{m}$  la tensión  $V_{pi} = 12\ \text{V}$ , y la tensión de “pull-out” es  $V_{po} = 8\ \text{V}$ . Para los actuadores con  $g_0 = 2.7\ \mu\text{m}$ , las tensiones medidas son  $V_{pi} = 26\ \text{V}$  y  $V_{po} = 21\ \text{V}$ . La divergencia entre los valores medidos y los obtenidos a partir de simulaciones de elementos finitos puede atribuirse a pequeñas diferencias en los espesores de las capas de oro y diferencias en la separación entre electrodos de los dispositivos fabricados.

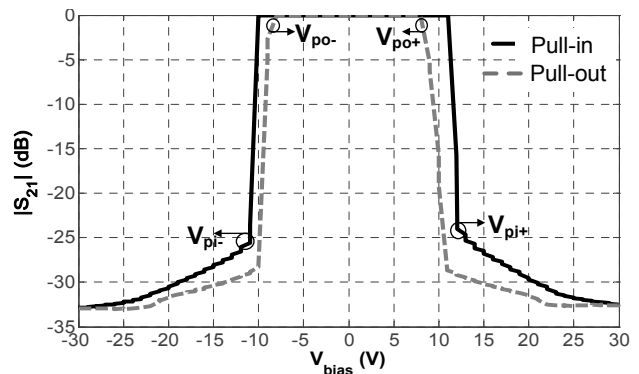


Fig. 8. Histéresis (a  $f = 50\ \text{MHz}$ ) de un conmutador ohmico con  $g_0 = 1.3\ \mu\text{m}$

Las características de RF de los actuadores óhmicos (respecto al modo impar de la CPW) se han medido utilizando sondas SG-GS, con un “pitch” de  $150\ \mu\text{m}$ . Después de normalizar los parámetros  $S$  obtenidos del tramo central, se puede observar que las pérdidas de inserción en el estado “alto” son menores que  $0.3\ \text{dB}$  hasta  $10\ \text{GHz}$  y que  $1.2\ \text{dB}$  hasta  $30\ \text{GHz}$ . El aislamiento (estado “bajo”) es mayor a  $20\ \text{dB}$  hasta  $8\ \text{GHz}$  y mayor a  $10\ \text{dB}$  hasta  $30\ \text{GHz}$ , como se muestra en la Fig.9.

La Fig.10 muestra el circuito equivalente del conmutador en estado “bajo”. La inductancia total del actuador es  $L_t = 0.18$  nH, mientras que su resistencia es  $R_t = 2 \Omega$ , que incluyen los efectos de la línea conectada a los planos de masa, interconexiones y contactos óhmicos. La tensión aplicada al hacer la medición es  $1.4 V_{pi}$ . El efecto del actuador sobre el modo CPW par es capacitivo. A partir de los parámetros  $S$  medidos con sondas GSG, se ha obtenido una capacidad en estado “bajo”  $C_{pe} = 0.095$  pF.

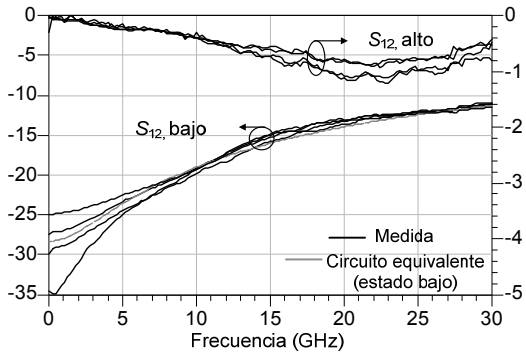


Fig. 9. Perdidas por inserción medidas de diferentes actuadores óhmicos, con  $g_0 = 1.3 \mu\text{m}$  y  $g_0 = 2.7 \mu\text{m}$  en estado alto y estado bajo (aislamiento).

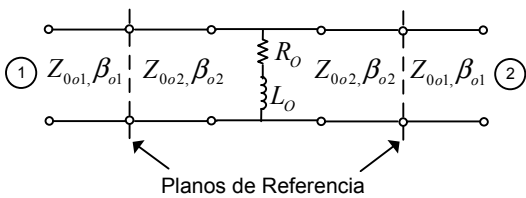


Fig. 10. Circuito equivalente del conmutador óhmico en estado “bajo”,  $R_0 = 2 \Omega$  y  $L_0 = 0.18$  nH.  $\beta_{o1}$  y  $\beta_{o2}$  son las constantes de fase del modo CPW impar.

#### IV. CONCLUSIÓN

Se han mostrado resultados experimentales de conmutadores RF-MEMS óhmicos y capacitivos de baja tensión de actuación. Los conmutadores cuentan con suspensiones que permiten reducir la tensión de actuación y una membrana reforzada que los hace menos susceptibles a gradientes de estrés. Los dispositivos se han fabricado utilizando diferentes espesores de capa sacrificial. Los conmutadores capacitivos ( $g_0 = 1.3 \mu\text{m}$ ) tienen una tensión de actuación  $V_{pi} = 12$  V y de acuerdo con el circuito equivalente mantienen un aislamiento mayor a 30 dB hasta 80 GHz.

El actuador óhmico propuesto se ha diseñado para utilizarse en circuitos multimodales reconfigurables y también puede ser utilizado en circuitos planares microstrip ó en circuitos slotline, donde se requieran conexiones entre separaciones demasiado grandes para utilizar conmutadores tipo “cantilever”; los cuales son muy susceptibles a gradientes de estrés.

El nuevo conmutador óhmico presenta un aislamiento (respecto al modo impar de la CPW) mayor a 10 dB hasta 30 GHz. Este desempeño puede mejorarse si se utilizan líneas de interconexión (en este caso líneas multimetal) más anchas.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por el proyecto TEC2010-20318-C02 y la beca BES-2008-004923 del ministerio de ciencia e innovación. Los autores agradecen al equipo MT-Lab de FBK por la fabricación de los dispositivos.

#### REFERENCIAS

- [1] G. M. Rebeiz, RF MEMS, Theory, Design and Technology. Wiley, 2003.
- [2] D. Peroulis, S. P. Pacheco, K. Sarabandi, y L. P. B. Katehi, “Electromechanical considerations in developing low-voltage RF MEMS switches”, *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, vol. 51, no. 1, pp. 259–270, Enero 2003.
- [3] J. Gauvin, F. Barriere, D. Mardivirin, A. Pothier, A. Crunteanu, P. Blondy, O. Vendier, J.L. Cazaux, “Design, fabrication and measurements of reliable low voltage RF-MEMS switched varactors,” *European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), 2011*, pp.434–437, 10–11 Octubre 2011.
- [4] W. C. Tang, T.-C. H. Nguyen, y R. T. Howe, “Laterally driven polysilicon resonant microstructures,” *Sensors and Actuators*, vol. 20, pp. 25–32, Noviembre 1989.
- [5] M. A. Llamas, D. Girbau, M. Ribó, L. Pradell, A. Lázaro, F. Giacomozzi, y B. Margesin, “MEMS-based 180° phase switch for differential radiometers,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol.58, no.5, pp. 1264–1272, Mayo 2010.
- [6] M. A. Llamas, D. Girbau, M. Ribó, L. Pradell, F. Giacomozzi, y S. Colpo, “RF-MEMS Uniplanar 180 Phase Switch Based on a Multimodal Air-Bridged CPW Cross”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol.59, no.7, pp. 1769–1777, Julio 2011.
- [7] A. Contreras, L. Pradell, M. Ribó “A Novel Tunable Multimodal Bandpass Filter” *41st European Microwave Conference EuMC-2011 Proceedings*, pp. 1059-1062, Manchester, UK, 9–14 Octubre 2011.
- [8] F. Giacomozzi, V. Mulloni, S. Colpo, J. Iannacci, B. Margesin, A. Faes, “A flexible technology platform for the fabrication of RF-MEMS devices”, *2011 International Semiconductor Conference (CAS)*, vol.1, pp.155-158, Sinaia, Romania, 17–19 Octubre 2011.