

# Evaluación de las prestaciones de filtros de orden elevado implementados con la nueva guía vacía integrada en sustrato

Ángel Belenguer<sup>(1)</sup>, Héctor Esteban<sup>(2)</sup>, Vicente E. Boria<sup>(2)</sup>, y José Vicente Morro<sup>(2)</sup>  
angel.belenguer@uclm.es, hesteban@com.upv.es, vboria@com.upv.es, jomorros@com.upv.es

<sup>(1)</sup>Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Automática y Comunicaciones  
Universidad de Castilla-La Mancha, Escuela Politécnica de Cuenca, Campus Universitario, 16071, Cuenca

<sup>(2)</sup>Departamento de Comunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia, 46022, Valencia

**Abstract**—In the last years a great number of substrate integrated circuits has been developed. These new circuits are a compromise between the advantages of classical waveguide technologies, such as high quality factor and low losses, and the advantages of planar circuits, such as low cost and easy compact integration. Although their quality factor and losses are better than for planar circuits, these characteristics are worse than in the case of waveguides, mainly due to the presence of the dielectric substrate. In order to improve the performance of the integrated circuits, a new methodology for manufacturing empty waveguides, without dielectric substrate, but at the same time completely integrated in a planar substrate has been recently proposed. A wide band transition with return losses greater than 20 dB in the whole bandwidth of the waveguide allows the integration of the empty waveguide into the planar substrate, so that the waveguide can be directly accessed with a microstrip line. Therefore a microwave circuit integrated in a planar substrate, but at the same time with a very high quality factor (measured quality factor is 4.5 times higher than for the same filter in SIW) and very low losses was successfully achieved.

In this work the performance of this new technology is tested through the simulation and measurement of high order filters (8 and 9 cavities filters).

## I. INTRODUCCIÓN

La primera guía de onda integrada en sustrato la propusieron Deslandes y Wu en 2001 [1]. Se trata por lo tanto de una tecnología reciente y con un gran interés. Sus prestaciones (factor de calidad y pérdidas) están a medio camino entre las prestaciones de las guías de onda clásicas y los circuitos planares.

Se ha dedicado mucho esfuerzo a integrar guías no planares en sustratos de circuitos impresos. A esto genéricamente se le llama Circuitos Integrados en Sustratos (SIC). Entre ellos hay una gran variedad (*Substrate Integrated Slab Waveguide* (SISW) [2], *Substrate Integrated Non-Radiating Dielectric guide* (SINRD) [3], [4], que se basa en la *Nonradiative Dielectric Waveguide* [5], o la *Half Mode Substrate Integrated Waveguide* (HMSIW) [6]), pero la más popular es la *Substrate Integrated Waveguide* (SIW), porque es muy sencillo aplicar las mismas técnicas clásicas de diseño de las guías rectangulares a las guías SIW.

Las guías SIW mejoran las prestaciones de los circuitos planares, ya que tienen menores pérdidas y mayores factores

de calidad, aunque las pérdidas y el factor de calidad son aún mejores en la guía rectangular que en la SIW. Por otro lado, y a diferencia de la guía de onda rectangular, la guía SIW es barata de fabricar, es integrable en circuitos impresos, y su volumen es menor debido a que tienen menor altura por estar integradas en un sustrato, y menor dimensión a lo largo de la dirección de propagación a causa de la presencia del dieléctrico que reduce la longitud de onda. Este menor volumen hace, eso sí, que el dispositivo sea más sensible a las tolerancias de fabricación, que pueden ser un factor muy limitante a alta frecuencia. Y, como ya se ha comentado, el hecho de que la SIW esté rellena de dieléctrico hace que aumenten las pérdidas y disminuya el factor de calidad si la compramos con la guía de onda rectangular.

En [7] se presentó un nuevo tipo de circuito integrado, al que se llamó *Empty Substrate Integrated Waveguide* (ESIW). Se trataba de una guía de ondas rectangular que se podía fabricar con bajo coste y con las mismas herramientas con las que se fabrican los circuitos planares. Además esta guía se fabrica vaciando un sustrato, de manera que es integrable con circuitos planares, gracias a una nueva transición de banda ancha que pasa de la línea microstrip en el sustrato a la guía vaciada en el mismo. Se presentaron resultados para filtros de cuatro y cinco cavidades, y se comprobó que estos dispositivos tenían un factor de calidad de alrededor de 4.5 veces el del dispositivo equivalente en SIW. Y todo ello manteniendo las propiedades de fácil fabricación e integración con circuitos planares, así como una mayor tolerancia a los errores de fabricación.

En este trabajo se ha querido validar las superiores prestaciones de la ESIW también para filtros de mayor orden. Para ello, en la sección de resultados se muestran los resultados de un filtro de 8 cavidades, y dos de 9.

## II. GUÍA VACÍA INTEGRADA EN SUSTRATO (ESIW)

En una SIW tradicional, las ondas electromagnéticas están confinadas en el cuerpo dieléctrico que cierran las paredes metálicas superior e inferior del sustrato, y las vías circulares laterales metalizadas (ver Fig. 1). En la ESIW, las ondas viajan en el vacío, y están confinadas por cuatro paredes metálicas

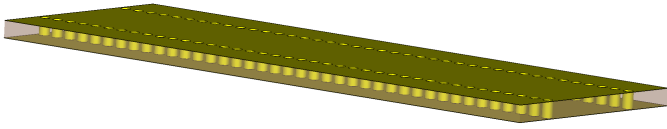


Fig. 1. Guía integrada en sustrato (SIW).

(superior, inferior, y dos paredes laterales). Esta estructura se fabrica cortando y vaciando una sección rectangular en el sustrato. A continuación se metaliza el sustrato y las paredes laterales de la ESIW se metalizan. Finalmente, dos capas metálicas delgadas se sueldan arriba y abajo del sustrato, cubriendo la ESIW (ver Fig. 2). La clave para que la ESIW

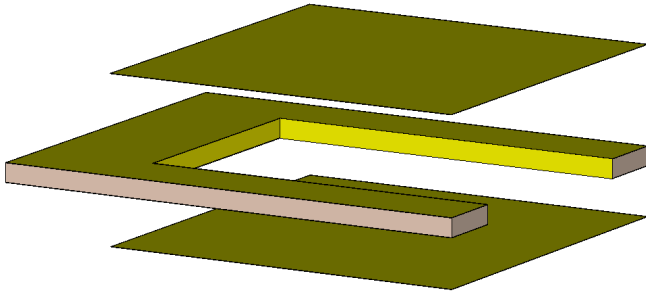


Fig. 2. Guía vacía integrada en sustrato (ESIW).

se pueda conectar a otros circuitos planares situados en el mismo sustrato está en la transición de microstrip a ESIW. Esta transición se muestra en la Fig. 3. Una descripción más detallada de la transición y de sus parámetros, de los valores iniciales para dichos parámetros utilizados antes de buscar los valores ideales mediante optimización, y un ejemplo del comportamiento de banda ancha de dicha transición se puede encontrar en [7].

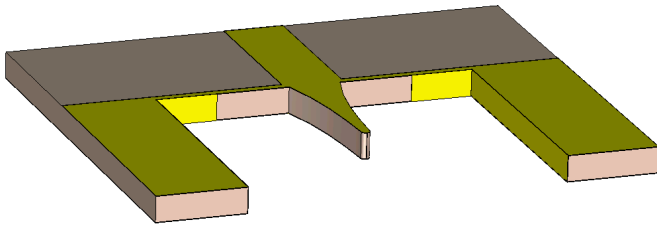


Fig. 3. Transición de microstrip a ESIW.

### III. RESULTADOS

Con la finalidad de comprobar las prestaciones de la nueva guía ESIW con filtros de orden elevado, se han diseñado tres filtros. Las especificaciones para cada uno de los tres filtros se detallan en la Tabla I. La figura Fig. 4 muestra el esquema de un filtro de 8 cavidades (como el filtro 1), y de un filtro de 9 cavidades (como los filtros 2 y 3). Como se puede observar se trata de filtros clásicos de cavidades

	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3
Número de cavidades	8	9	9
Frecuencia central	15 GHz	15 GHz	15 GHz
Ancho de banda	1 GHz	500 MHz	1 GHz
Tipo de respuesta	Chebyshev	Chebyshev	Chebyshev
Rizado	0,1 dB	0,1 dB	0,1 dB

TABLE I  
ESPECIFICACIONES DE LOS TRES FILTROS DISEÑADOS.

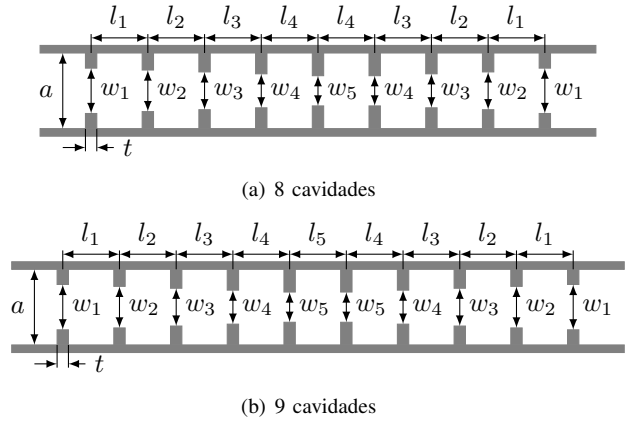


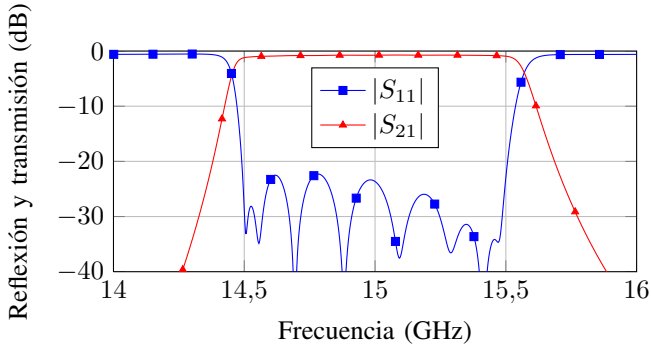
Fig. 4. Esquema de filtros de cavidades acopladas.

acopladas en plano H. Para diseñar los tres filtros, se ha seguido el procedimiento estándar de síntesis basado en el circuito equivalente con inversores y líneas de transmisión [8]. Todos los filtros de han diseñado utilizando la anchura de la guía estándar WR-62 ( $a=15.7988$  mm), y la longitud de los iris se ha fijado a  $t=2$  mm. El resto de parámetros geométricos (longitudes de las cavidades, y anchura de las ventanas de acoplo), son parámetros de diseño. Los filtros son simétricos. En la Tabla II se muestran los valores óptimos de

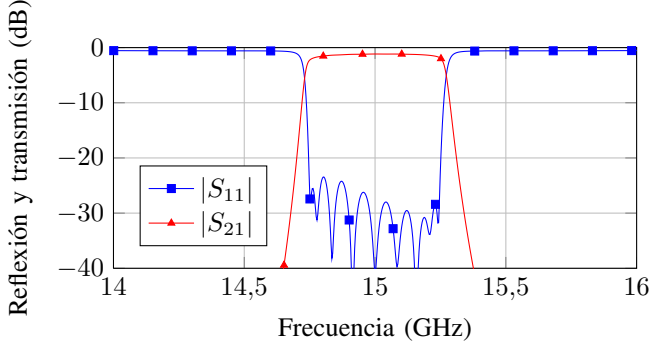
	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3
$t$	2.0000	2.0000	2.0000
$a$	15.7988	15.7988	15.7988
$w_1$	9.2083	8.2037	9.1568
$w_2$	6.7221	5.5310	6.6690
$w_3$	6.0606	4.9750	6.0297
$w_4$	5.9048	4.8529	5.8744
$w_5$	5.8714	4.8179	5.8271
$l_1$	11.1141	12.1412	11.1830
$l_2$	12.7630	13.5535	12.7908
$l_3$	13.1117	13.7611	13.1327
$l_4$	13.1845	13.8045	13.2074
$l_5$	-	13.8139	13.2287

TABLE II  
DIMENSIONES DE LOS FILTROS EN MM.

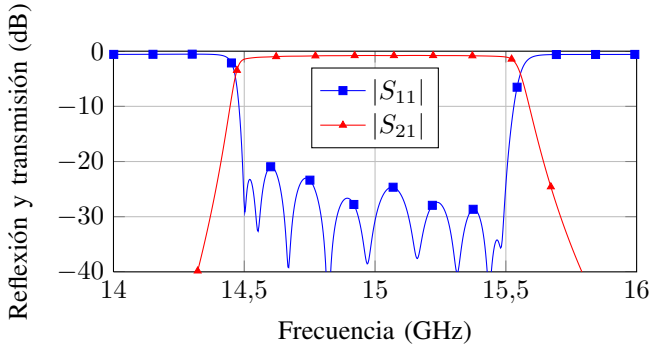
las dimensiones de los tres filtros tras completar el proceso de diseño. Utilizando los valores de la Tabla II, se ha utilizado un simulador electromagnético para obtener la respuesta en frecuencia de los tres filtros. Las respuestas se pueden ver en la Figura 5. Para comprobar las prestaciones de los diseños realizados, se ha calculado el factor de calidad de cada uno



(a) Filtro 1



(b) Filtro 2



(c) Filtro 3

Fig. 5. Respuesta en frecuencia simulada para los tres filtros diseñados.

de los tres filtros de forma analítica. Para ello se utiliza la fórmula del factor de calidad de una cavidad de dimensiones  $a \times b \times d$  obtenida a partir de las expresiones de la energía almacenada y la potencia disipada para el caso  $TE_{101}$ :

$$Q = \frac{\pi\eta}{4R_s} \left[ \frac{2b(a^2 + d^2)^{3/2}}{ad(a^2 + d^2) + 2b(a^3 + d^3)} \right] \quad (1)$$

donde  $a$  es la anchura de la cavidad,  $b$  es la altura, y  $d$  es la longitud. En el caso de los filtros en ESIW, todas las cavidades son de la misma anchura,  $a = 15,7988$  mm. Como los filtros se van a implementar en un sustrato dieléctrico Rogers 4003C cuya altura es  $1,524$  mm, en todos los casos la altura de la cavidad es  $b = 1,524$  mm. La longitud  $d$  es el parámetro  $l_i$  ( $i \in [1, \dots, 9]$ ) correspondiente a cada cavidad.

Una vez calculado el factor de calidad de todas las cavidades del filtro, nos quedamos con el peor valor de todos (el más bajo). Haciendo este proceso para los tres filtros diseñados, se obtienen los valores de factor de calidad que se muestran en la Tabla III. Como se ha indicado en la introducción, el proceso

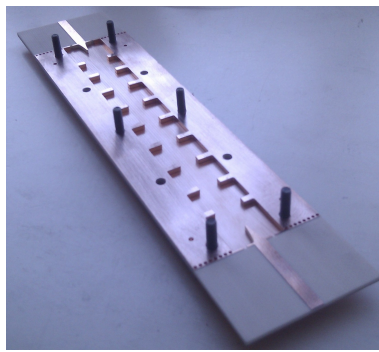
	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3
$Q$	2297	2249	2294

TABLE III  
FACTORES DE CALIDAD.

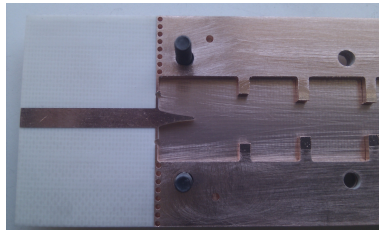
de fabricación de los dispositivos ESIW es muy sencillo, y se puede realizar con las herramientas estándar de fabricación de circuitos planares. En este caso se ha utilizado una máquina LPKF Protomat S103, que corta, fresa y taladra con una precisión de  $0,5 \mu\text{m}$ , y con una repetitividad de  $\pm 0,001$  mm. A la vez que se fabrica un dispositivo ESIW se pueden fabricar varios dispositivos en tecnología SIW en el mismo sustrato. En primer lugar, se corta el sustrato para formar el interior del filtro (cavidades acopladas), y se taladran vías metálicas si se quieren fabricar a la vez otros dispositivos que lo requieran. A continuación se metaliza el sustrato, y se metalizan las paredes laterales de la ESIW (y las vías que se hayan taladrado). Se cortan las transiciones y se desprende el interior de las cavidades del filtro ESIW, quedando éstas vacías. Se fresa la capa superior del sustrato para formar las líneas microstrip. Se corta cada dispositivo por separado, separándolo del sustrato. Para terminar el filtro ESIW, se sueldan dos placas metálicas mediante una pasta de estaño adhesiva que pega las placas superior e inferior. Esta pasta se seca posteriormente introduciendo el dispositivo en un horno de reflujo. De los tres filtros diseñados, se ha fabricado el de 8 cavidades. En la Figura 6 se muestran varias fotos del prototipo fabricado. Se muestra una vista del filtro completo, en perspectiva, una vista superior, y una foto en la que se puede apreciar con detalle cómo está mecanizada la transición de microstrip a ESIW. Una vez fabricado el filtro, éste ha sido medido con el analizador de redes vectorial. Los resultados de las medidas se muestran en la Fig. 7, donde las medidas se pueden comparar con las simulaciones proporcionadas por el simulador comercial. Se puede apreciar una buena coincidencia entre las medidas y las simulaciones, excepto por una ligera desviación en frecuencia que pensamos que se debe a problemas de fabricación (holgura por desgaste del cabezal de la taladradora). En cualquier caso las medidas son muy buenas, y corroboran la viabilidad de esta nueva topología (ESIW) como alternativa a otras topologías de guía integrada en sustrato, como la SIW. Para reforzar esta afirmación, se ha determinado el factor de calidad del filtro a partir de las medidas, utilizando la siguiente formulación [9]:

$$Q_u = 4,343 \sum_{i=1}^n \frac{\Omega_C}{FBW \Delta L_{A0}} g_i \text{ dB} \quad (2)$$

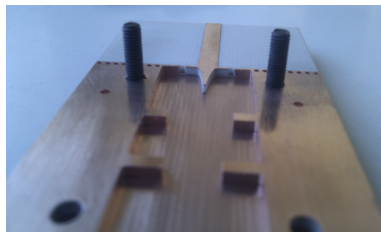
donde para el filtro de Chebyshev de orden  $n = 8$  que hemos fabricado,  $\Omega_C = 1$ , y los coeficientes del prototipo paso-bajo son  $g_1 = 0,8073$ ,  $g_2 = 1,4131$ ,  $g_3 = 1,7825$ ,  $g_4 = 1,6833$ ,



(a) Filtro completo



(b) Vista superior



(c) Transición

Fig. 6. Filtro de 8 cavidades fabricado.

$g_5 = 1,8529$ ,  $g_6 = 1,6193$ ,  $g_7 = 1,5555$ ,  $g_8 = 0,7334$ .  $FBW$  es el ancho de banda fraccional  $FBW = BW/f_0 = 1/15 = 0,0667$ . Finalmente,  $\Delta L_{A0}$  es el incremento de pérdidas a la frecuencia central del filtro, comparando las medidas con la respuesta ideal sin pérdidas (0 dB para el filtro de Chebyshev), y que en el caso del filtro de 8 cavidades es 0,35 dB. Con todos estos datos se obtiene un factor de calidad de  $Q_u = 2,151$ , que es un valor muy próximo al valor ideal calculado mediante (1). En [7] los valores medidos del factor de calidad estaban más lejos de los teóricos. Probablemente el uso de una nueva pasta más conductora para pegar las tapas superior e inferior de la ESIW sean las causantes de esta mejora en el factor de calidad del dispositivo fabricado.

#### IV. CONCLUSIONES

Se han diseñado tres filtros de cavidades acopladas en la nueva tecnología ESIW. En todos ellos, el factor de calidad que se ha calculado es muy elevado, probando las bondades de este nuevo tipo de guía integrada en sustrato, con unas prestaciones muy superiores a otras guías integradas en sustrato existentes hasta el momento, tales como la SIW. De esos tres filtros, se ha fabricado uno de ellos, y el factor de calidad calculado a partir de las medias ha resultado muy elevado, casi igual

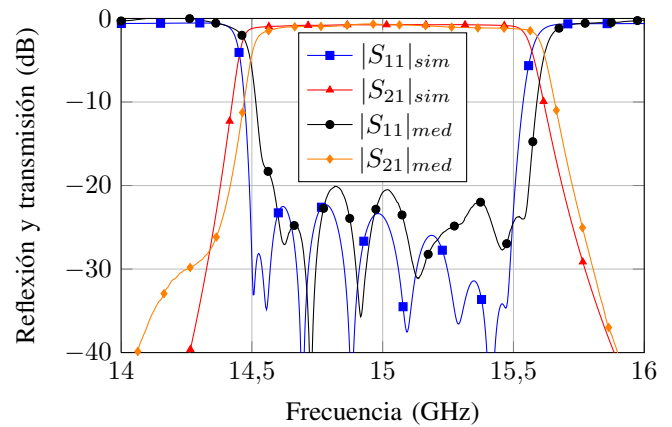


Fig. 7. Resultados Filtro 8 cavidades.

que el calculado de forma analítica a partir del simulador electromagnético.

#### REFERENCES

- [1] D. Deslandes and K. Wu, "Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 11, no. 2, pp. 68–70, February 2001.
- [2] D. Deslandes, M. Bozzi, P. Arcioni, and K. Wu, "Substrate integrated slab waveguide (SISW) for wideband microwave applications," in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2003*, vol. 2, 2003, pp. 1103–1106 vol.2.
- [3] Y. Cassivi and K. Wu, "Substrate integrated nonradiative dielectric waveguide," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 14, no. 3, pp. 89–91, 2004.
- [4] —, "Substrate integrated NRD (SINRD) guide in high dielectric constant substrate for millimetre wave circuits and systems," in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2004*, vol. 3, 2004, pp. 1639–1642 Vol.3.
- [5] T. Yoneyama and S. Nishida, "Nonradiative dielectric waveguide for millimeter-wave integrated circuits," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 29, no. 11, pp. 1188–1192, 1981.
- [6] W. Hong, B. Liu, Y. Wang, Q. Lai, H. Tang, X. X. Yin, Y. D. Dong, Y. Zhang, and K. Wu, "Half mode substrate integrated waveguide: A new guided wave structure for microwave and millimeter wave application," in *Joint 31st International Conference on Infrared Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics, 2006. IRMMW-THz 2006*, September 2006, pp. 219–219.
- [7] A. Belenguer, H. Esteban, and V. E. Boria, "Novel empty substrate integrated waveguide for high-performance microwave integrated circuits," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. To be published, pp. 1–8, April 2014.
- [8] G. L. Matthaei, L. Young, and E. M. T. Jones, *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*. McGraw-Hill, 1964.
- [9] J.-S. Hong and M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001.