

## Implementación de una cavidad SIW en tecnología LTCC con un sustrato de alta permitividad en banda S\*

Implementation of an S Band SIW Cavity in LTCC Technology with a High Permittivity Substrate

Recibido: 18 de agosto de 2015 - Aceptado: 17 de febrero de 2016

Para citar este artículo: R. Guerrero, «Implementación de una cavidad SIW en tecnología LTCC con un sustrato de alta permitividad en banda S», *Ingenium*, vol. 17, n.º 34, pp. 11-18, mayo, 2016..



Rubén Darío Guerrero E. \*

### Resumen

Este artículo presenta la implementación de un prototipo de prueba de una cavidad resonante SIW en banda S, utilizando la tecnología LTCC en combinación con un sustrato de alta permitividad (sustrato Heraeus Heratape @CT765,  $\epsilon_r = 68,7$  a 2.5 GHz). Dicho diseño aprovecha las características que ofrece la tecnología SIW tales como un factor de calidad elevado y su capacidad de integración con tecnologías planares, junto con la flexibilidad de diseño y la reducción de tamaño proporcionadas por la tecnología multicapa LTCC en un ambiente de alta permitividad. La topología presentada está encaminada a determinar el valor de la constante dieléctrica del sustrato en la banda especificada, así como para verificar la precisión y capacidades de manufactura de la empresa seleccionada para la fabricación de prototipos en tecnología LTCC.

\* Grupo de Investigación LabSTICC, investigación sobre miniaturización de dispositivos de microondas en tecnología LTCC. Lab-STICC UMR CNRS 3192, CS 93837 – 29238 Brest Cedex. Francia.

\*\* Ph. D. en Ingeniería con énfasis en Electrónica de Microondas, Université de Bretagne Occidentale, Lab-STICC, 6 avenue Le Gorgeu, CS 93837, 29238 Brest Cedex 3. E-mail: rguerrero@univ-brest.fr

## Palabras clave

SIW, LTCC, permitividad, cavidad.

## Abstract

This paper presents the design and implementation of an S band SIW resonant cavity in LTCC technology, using a high permittivity substrate (substrate Heraeus Heratape ®CT765,  $\epsilon_r = 68,7$  at 2.5 GHz). The design takes advantage of the characteristics offered by the SIW technology such as a high unloaded quality factor and easiness of integration with planar technologies, along with the design flexibility and size reduction provided by the LTCC multilayer technology in a high permittivity environment. The presented topology is aimed to determine the dielectric constant value of the substrate at the specified band as well as to verify the accuracy and manufacturing capabilities of the chosen foundry for prototypes fabrication in LTCC technology.

## Keywords

SIW, LTCC, permittivity, cavity.

## 1. Introducción

En el entorno actual de los sistemas de telecomunicaciones existe un interés creciente por el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan reducir el tamaño de sus componentes y que a la vez ofrezcan un desempeño eléctrico elevado. En un sistema de comunicaciones típico, componentes tales como antenas, filtros, amplificadores, duplexores, etc., coexisten en un entorno reducido, razón por la cual su tamaño y peso total son cruciales dentro del proceso de concepción [1].

En este contexto, la tecnología SIW (Substrate Integrated Waveguide) ofrece una serie de características interesantes, tales como un factor de calidad elevado, bajas pérdidas de radiación y facilidad de integración con otros componentes presentes sobre el mismo sustrato, en particular los MMIC (Microwave Monolithic Integrated Circuits) [2]. Dicha tecnología es utilizada para el desarrollo de una gran variedad de componentes de microondas tales como filtros, acopladores, amplificadores, mezcladores y antenas entre otros [3]. Sin embargo, su volumen y superficie asociada son un inconveniente, especialmente cuando el valor de la frecuencia de operación se reduce, lo cual conduce a una longitud de onda elevada. Como alternativa de solución para resolver este problema, se proponen dos técnicas: la utilización de un sustrato de alta permitividad y la aplicación de la tecnología LTCC (Low temperature Co-fired Ceramic), para el apilado de cavidades. La solución desarrollada ofrece una gran flexibilidad de diseño, buen desempeño eléctrico y una excelente capacidad de reducción de tamaño en las 3 dimensiones. En relación con la implementación de circuitos SIW en tecnología LTCC, se puede encontrar en la literatura algunas referencias tales como [4-6]. Dichos trabajos se centran básicamente en la capacidad de integración vertical de la tecnología para la reducción del tamaño total de los circuitos. Sin embargo, estos no explotan el potencial de miniaturización adicional ofrecido por un sustrato de alta constante dieléctrica, lo cual se constituye en el principal aporte de este trabajo.

El objetivo de este artículo es presentar el diseño de una cavidad SIW en banda S con base en la combinación de las técnicas mencionadas. Dicho prototipo se emplea para determinar la constante dieléctrica del sustrato en la banda especificada así como para evaluar la capacidad del fabricante para manufacturar circuitos de microondas en tecnología LTCC, todo ello con miras a la realización de una implementación más compleja.

## 2. Cavidad SIW en tecnología LTCC con un sustrato de alta permitividad

### 2.a. Generalidades de la tecnología LTCC

Dentro del entorno actual de los sistemas de microondas, la tecnología LTCC ha adquirido una gran popularidad debido a su capacidad para dar respuesta a los requerimientos de miniaturización, costo y complejidad de las aplicaciones MMIC y de ondas milimétricas [7], junto con la posibilidad de integración de componentes en un mismo sustrato. Esta tecnología consiste en el apilamiento de varias capas de sustrato, cada una de las cuales ha sido metalizada de manera individual y con base en un procedimiento estándar. Las capas de sustrato son perforadas, serigrafiadas y cortadas por separado. Posteriormente, estas son apiladas, laminadas y sinterizadas a una temperatura de alrededor de 900 °C, obteniendo al final una estructura compacta y homogénea. El proceso se caracteriza porque el producto final se comporta como si solo hubiera un único sustrato sin degradar las propiedades eléctricas entre las capas de sustrato. Debido a las temperaturas relativamente bajas presentes durante el proceso de sinterizado, es posible utilizar tintas conductoras de alta calidad junto con la posibilidad de utilizar metales como plata, oro o cobre, sin comprometer sus propiedades eléctricas. La figura 1 describe el proceso de fabricación de un circuito LTCC.

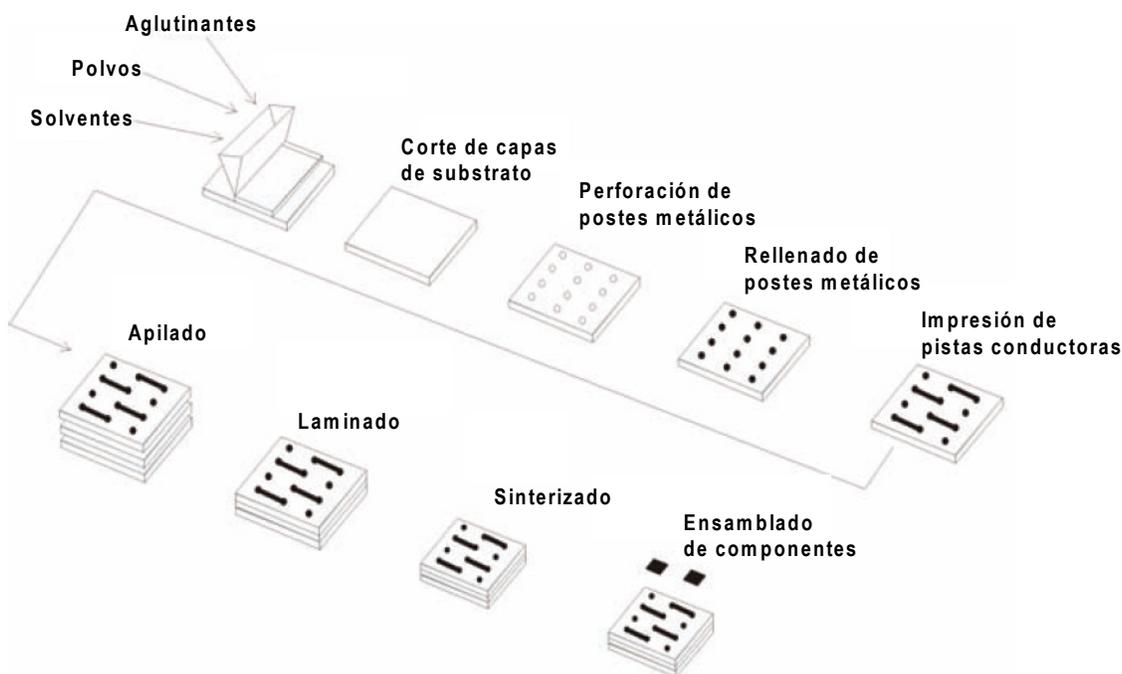


Figura 1. Proceso de fabricación de un circuito en tecnología LTCC [8]

El sustrato de alta permitividad utilizado para el diseño de la cavidad es el Heraeus Heratape ®CT765, totalmente compatible con la tecnología LTCC. Su permitividad relativa es de  $\epsilon_r = 68,7$  y posee una tangente de pérdidas de  $\tan\delta = 1,73 \cdot 10^{-3}$ . Este sustrato se produce en capas de 50 micras (37 um después del proceso de sinterizado). La empresa escogida para la realización de la cavidad es europea, elegida en virtud de su capacidad para proporcionar una precisión de fabricación de grado industrial. Las reglas de concepción para el desarrollo de los circuitos se encuentran en la guía de diseño LTCC proporcionada por la empresa. Estas definen el diámetro y el espacio entre los postes metálicos, el ancho de las líneas metálicas y la altura máxima de la estructura entre otros. Es importante cumplir estrictamente con dichas reglas para asegurar la fabricación exitosa de los prototipos así como una buena concordancia entre los resultados de simulación y las mediciones.

### 2.b. Procedimiento de concepción de la cavidad

El procedimiento de diseño de la cavidad comienza con la determinación del modo de resonancia fundamental y el cálculo de sus dimensiones (largo, ancho y alto). El modo de resonancia escogido es el  $TE_{101}$ , el cual reduce el nivel de pérdidas dentro de la cavidad, aumenta el rechazo de modos TM y TE espurios y además conduce a una cavidad de forma cuadrada, reduciendo su tamaño total. El ancho  $a$  y la longitud  $l$  de la cavidad se calculan empleando las siguientes ecuaciones [9]:

$$f_r = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\frac{1}{(2a)^2} + \frac{1}{(2l)^2}} \quad (1.)$$

$$l = \frac{c}{f_r} \sqrt{\frac{1}{2\epsilon_r}} \quad (2.)$$

Donde  $f_r$  es la frecuencia de resonancia de la cavidad,  $c$  es la velocidad de la luz en espacio libre y  $\epsilon_r$  corresponde a la permitividad relativa del sustrato. De acuerdo al modo de resonancia elegido,  $a = l$  ya que la cavidad tiene forma cuadrada. La altura de la cavidad  $h$  depende del número de capas de sustrato utilizado en su estructura, el cual está relacionado con el factor de calidad al vacío  $Q_u$ . Por lo tanto, se debe escoger un valor de altura de la cavidad  $h$  tal que permita satisfacer las especificaciones eléctricas de la aplicación a desarrollar. El valor de  $Q_u$  se determina por medio del cálculo del factor de calidad del dieléctrico  $Q_d$  y del factor de calidad del conductor  $Q_c$  mediante las siguientes expresiones, válidas para el modo de resonancia  $TE_{101}$  [10]:

$$\frac{1}{Q_u} = \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_c} \quad (3.)$$

$$Q_d = \frac{1}{\tan \delta} \quad (4.)$$

$$Q_c = \frac{\lambda_r}{\delta_s} \cdot F \quad (5.)$$

$$F = \frac{alh}{2} \frac{\left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{h^2}\right)^{3/2}}{\frac{h}{a^2}(a+2l) + \frac{a}{h^2}(h+2l)} \quad (6.)$$

Donde  $\tan\delta$  es la tangente de pérdidas del sustrato,  $\lambda_r$  representa la longitud de onda en el espacio libre,  $\delta_s$  es la profundidad de penetración del metal y  $F$  es el factor de forma de la cavidad. La figura 2 presenta la evolución de  $Q_u$  en función del número de capas. De acuerdo a las curvas, el valor de  $Q_d$  no puede modificarse, ya que depende de las pérdidas del material utilizado como sustrato. Por otra parte, la magnitud de  $Q_c$  puede optimizarse al aumentar su espesor. Para la cavidad en cuestión, se eligió un valor de  $h \approx 1,3$  mm, el cual corresponde a 36 capas de sustrato apiladas con la tecnología LTCC. Según la figura 2, el valor de  $Q_u$  obtenido con dicho espesor es de 339.7. Dicho valor es acorde con los valores típicos obtenidos en la tecnología SIW. Sin embargo, debido al alto valor de la tangente de pérdidas del sustrato el valor de  $Q_d$  es reducido, disminuyendo en consecuencia el valor total de  $Q_u$ . Por otra parte, la curva de  $Q_d$  introduce una asíntota sobre el crecimiento de  $Q_u$ , cuyo límite está fijado por su valor ( $Q_d = 578$ ). Así, el valor de  $Q_u$  de la cavidad puede ser mejorado solamente hasta un cierto límite a medida que el número de capas de sustrato es incrementado.

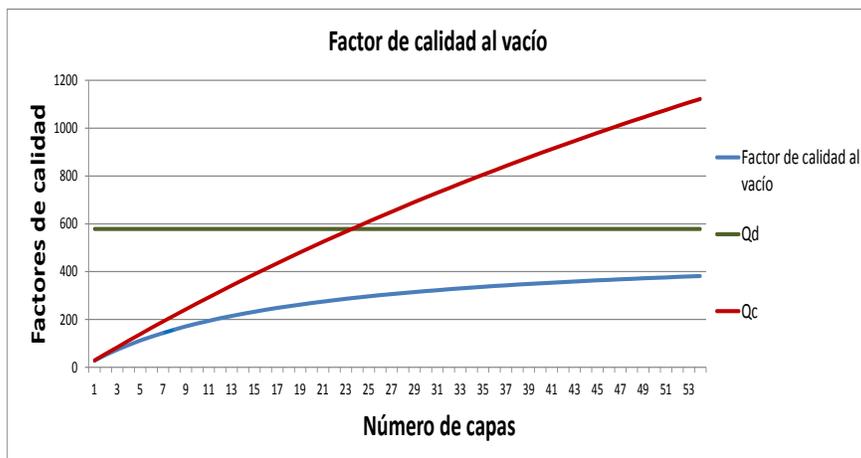


Figura 2. Factor de calidad al vacío de una cavidad vs. número de capas de sustrato

## 2.c. Estructura física de la cavidad SIW

La figura 3 muestra la vista superior y en 3 dimensiones de la cavidad SIW. El software de simulación electromagnética HFSS<sup>TM</sup> fue utilizado para modelar y sintonizar la respuesta eléctrica de su estructura. La cavidad se alimenta a través de un acceso CPW (Coplanar Waveguide) grabado directamente en la metalización superior, el cual proporciona un acople óptimo de potencia al interior de la cavidad. Las dimensiones de las ranuras de acople se ajustan de manera conveniente para obtener un nivel de adaptación de la respuesta eléctrica superior a 25 dB en la frecuencia de interés, tomando como punto de partida una longitud de  $\lambda/4$  para cada ranura doblada y considerando además un pitch de 150  $\mu\text{m}$  en la línea de acceso para asegurar su compatibilidad con la estación de sondas empleada para realizar la medición del prototipo.

Por otro lado, para delimitar las paredes de la cavidad se introducen arreglos de postes escalonados conectados entre sí mediante una pista metálica. Se lleva a cabo dicha acción ya que según las reglas de diseño impuestas por el fabricante de los prototipos no se permite la utilización de postes superpuestos en línea recta, ya que puede generar

abultamientos en la superficie del circuito. Los postes metálicos deben tener una altura correspondiente a 3 capas de substrato ( $3 \times 37.5 = 112.5 \mu\text{m}$ ). Luego, para aumentar el aislamiento de las paredes de la cavidad y reducir las pérdidas por radiación, se introducen dos arreglos de postes escalonados, tal como se muestra en la figura 4.

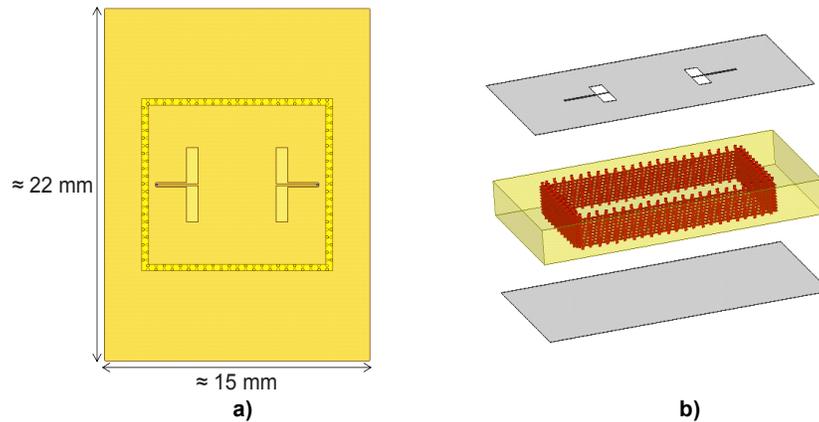


Figura 3. Cavidad SIW en tecnología LTCC a) Vista superior b) Vista en 3D

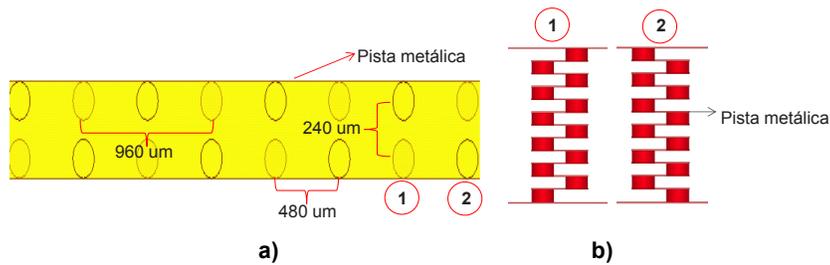


Figura 4. Estructura del patrón de postes metálicos utilizados para delimitar la cavidad a) Vista superior b) Vista transversal del patrón

## 2.d. Simulación y resultados experimentales

La figura 5 presenta la respuesta electromagnética de la cavidad obtenida en HFSS™. La sintonización de su frecuencia de resonancia se logra mediante el ajuste de su ancho y largo así como de las dimensiones de la ranura CPW utilizada como acceso. Adicionalmente, la figura 6 muestra los resultados de medición de la cavidad. Según los resultados obtenidos, las pérdidas de inserción y de retorno son de 0.68 dB y 18.94 dB respectivamente. Por otra parte, el ancho de banda es del 9.6 %, frente al 9 % registrado en el resultado de simulación. Dicha diferencia se debe principalmente a errores de precisión en la fabricación y al efecto de contracción de las capas de substrato durante el proceso de sinterizado, el cual también puede afectar las dimensiones de la cavidad. Se evidencia igualmente un desplazamiento en frecuencia de alrededor del 6 % entre la medición y los resultados de simulación, el cual se debe principalmente a la dispersión de la permitividad del substrato. Por ello, se procede a realizar una retrosimulación del valor de dicho parámetro para encontrar su valor real.

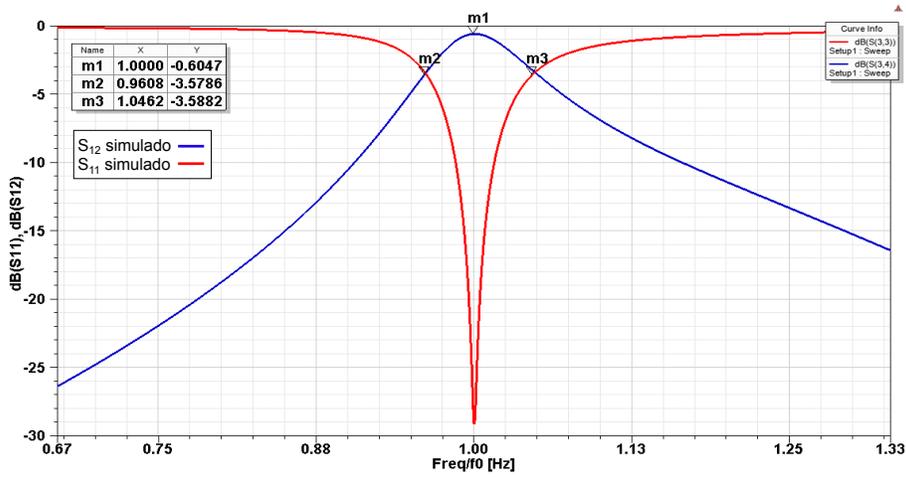


Figura 5. Simulación electromagnética de la cavidad

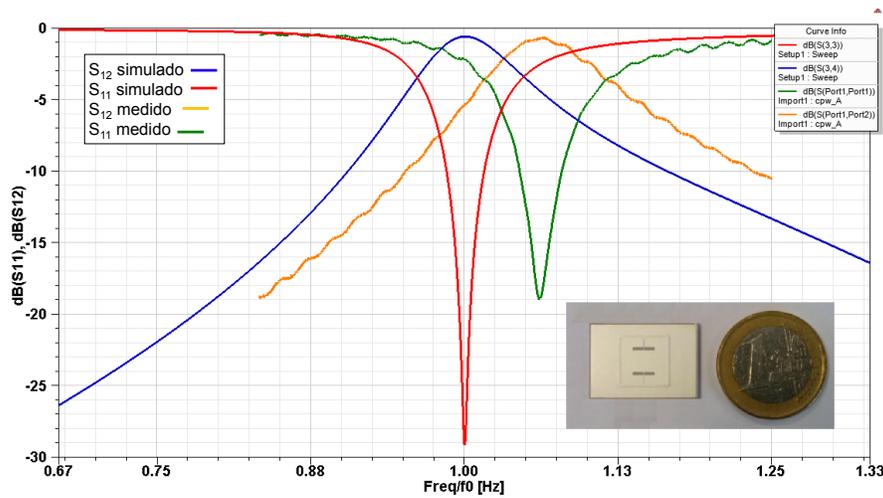


Figura 6. Comparación entre la respuesta obtenida en simulación y la medición

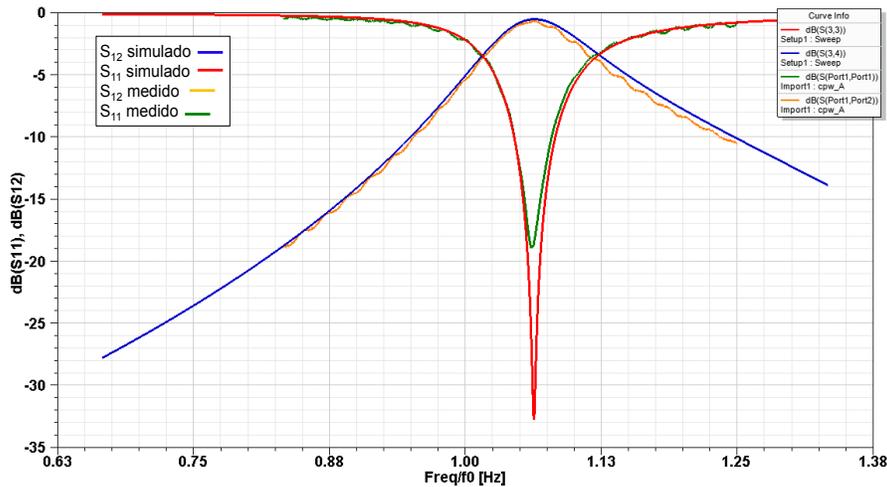


Figura 7. Respuesta electromagnética de la retrosimulación

La figura 7 muestra la respuesta electromagnética de la retrosimulación, cuya ejecución arroja un valor de permitividad de  $\epsilon_r \approx 61$ . En general se observa una buena concordancia entre la respuesta obtenida en simulación y la medición, validando de esta manera el valor de permitividad obtenido así como el proceso de fabricación de la cavidad.

### 3. Conclusión

La técnica de implementación de circuitos SIW en combinación con la tecnología LTCC y un sustrato de alta permitividad brinda una gran compacidad y buen desempeño eléctrico. Una cavidad SIW fue desarrollada con base en la aplicación de estas dos técnicas, obteniendo una estructura de tamaño reducido y respuesta eléctrica satisfactoria.

Por otro lado, el prototipo citado valida las capacidades de fabricación de la empresa escogida para la manufactura de los prototipos, considerando factores como la precisión de grabado y de perforación de postes así como la contracción de las capas de sustrato. Finalmente, dicha estructura es de utilidad para calcular el valor real de la permitividad relativa en la banda de frecuencia especificada, información de interés para futuras implementaciones. La estructura SIW desarrollada puede ser utilizada como base del desarrollo de aplicaciones más complejas, tales como el diseño de antenas, filtros de microondas, circuladores y multiplexores entre otros, todo ello basado en la tecnología LTCC. En el caso de las antenas, la cavidad puede emplearse como elemento radiante mediante la inserción de ranuras de radiación. De manera similar, la cavidad diseñada puede ser utilizada como un resonador para el desarrollo de un filtro o un multiplexor SIW.

### 4. Referencias IEEE Transactions on Antennas and Propagation

- [1] A. El Mostrah, B. Potelon, E. Rius, C. Quendo, J-F. Favennec, H. Leblond. "Comparative study of Two C-band SIW filter topologies for a space application". *European Microwave Conference (EuMC)*, n.º 42. 2012. pp.368-371.
- [2] D. Deslandes, K. Wu. "Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form". *IEEE Microwave Wireless Components Letters*, n.º 11. 2001. pp. 68-70.
- [3] M. Bozzi, A. Georgiadis, K. Wu. "Review of substrate-integrated waveguide circuits". *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. Special Issue, n.º 5. 2010. pp. 909-920.
- [4] J. Xu, Z. N. Chen, X. Qing, W. Hong. "140-GHz Planar Broadband LTCC SIW Slot Antenna Array". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. n.º 60. 2012. pp.3025-3028.
- [5] H. M. Hizan, Z. Ambak, A. Ibrahim, M.Z.M. Yusoff. "Q-band millimeter-wave SIW filter using LTCC technology". *IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE)*, pp.199-202, 2014.
- [6] H. Abuzaid, A. Doghri, K. Wu, A. Shamim. "SIW based multilayer transition and power divider in LTCC technology". *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (IMS)*. 2013. pp.1-3.
- [7] R.E. Amaya, L. Ming, K. Hettak, J. Cornelius, Verber. "A broadband 3D vertical Microstrip to Stripline transition in LTCC using a quasi-coaxial structure for millimetre-wave SOP applications". *European Microwave Conference (EuMC)*. 2010. pp.109-112.
- [8] M. Lathi. *Gravure offset printing for fabrication of electronic devices and integrated components in LTCC modules*. Tesis de doctorado. Oulu. Facultad de Tecnología de la Universidad de Oulu, 2008. pp.23-25.
- [9] D. Deslandes, K. Wu. "Accurate modeling, wave mechanisms, and design considerations of a substrate integrated waveguide", *IEEE Microwave Theory and Techniques*, n.º 54. 2006. pp. 2516-2526.
- [10] G. Boudouris, A. Kastler. *Cavités électromagnétiques*. Paris. 1.ª edición. Editorial Dunod. 1971. pp. 83-86.