

# Filtro paso banda en tecnología groove gap waveguide con altura de pines reducida para facilitar su fabricación

D. Santiago<sup>(1)</sup>, M. A. G. Laso<sup>(1)</sup>, T. Lopetegi<sup>(1)</sup> y I. Arregui<sup>(1)</sup>.  
david.santiago@unavarra.es, mangel.gomez@unavarra.es, txema.lopetegi@unavarra.es,  
ivan.arregui@unavarra.es.

<sup>(1)</sup> Instituto de Smart Cities (ISC), Dpto. de Ing. Eléctrica, Electrónica y de Comunicación. Univ. Pública de Navarra (UPNA), Pamplona, España.

**Abstract-** In this work, a novel topology of groove gap waveguide (GGW) technology is presented to facilitate the fabrication process by Computer Numerical Control (CNC) milling. GGW has been proposed as an interesting alternative to the rectangular waveguide for the design of microwave and millimeter-wave components. This technology consists of two parallel metal plates, where one of them has a  $\lambda/4$ -height pin bed that provides a high impedance condition at the plane over the pins, avoiding electrical contact requirement with the upper plate and hence facilitating the fabrication requirements. However, the manufacture by CNC milling of the pins may be troublesome, especially for devices operating at high frequency. A way to facilitate this process is achieved by using pins with reduced height. Moreover, the proposed configuration allows us to maintain the standard dimension ports of the equivalent rectangular waveguide and the operation in its corresponding bandwidth. A comparison with other GGW topologies has been presented and a bandpass filter has been fabricated to validate its usefulness.

## I. INTRODUCCIÓN

La tecnología GGW ha sido propuesta como una alternativa a las guías de onda convencionales, principalmente para altas frecuencias de funcionamiento [1], [2]. Su topología se basa en 2 placas metálicas paralelas, en una de las cuales tenemos una estructura periódica de pines, ver Fig.1. Esta estructura de pines introduce una condición de alta impedancia en el plano superior de los pines, consiguiendo que al colocar la tapa superior sobre los pines a una distancia (gap) menor que  $\lambda/4$  ninguna onda pueda propagarse en esta zona, permitiendo que no sea necesario el contacto entre ambas placas [3], [4]. Además, para un correcto funcionamiento de la estructura, la altura de los pines debe tomar un valor próximo a  $\lambda/4$  [5], [6]. De esta forma, el comportamiento electromagnético de esta tecnología es similar a la de la guía de onda rectangular [7], [8].

Sin embargo, la fabricación de dispositivos implementados en GGW supone una importante ventaja respecto a la guía de onda rectangular, ya que evita la necesidad de contacto y alineamiento entre las distintas piezas que forman los dispositivos. Tal y como se ha comentado anteriormente, esta ventaja es de especial importancia cuando se opera a altas frecuencias. A pesar de ello, la fabricación mediante CNC milling del gran número de pines que requiere esta tecnología puede ser problemática.

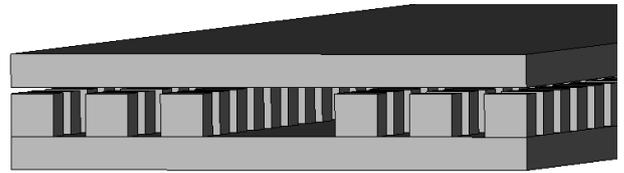


Fig. 1. Tecnología GGW.

En los últimos años se han propuesto diferentes alternativas a la GGW clásica para mejorar sus prestaciones [8]-[15]. Por ejemplo, podemos encontrar distintos tipos de pines: circulares [8], cuadrados [1], piramidales [9], cónicos [10] y cuadrados de altura reducida [12], [13]. Al igual que la tecnología clásica, los 4 primeros utilizan pines con una altura similar a  $\lambda/4$ . Al ser tan altos, esto puede causar diferentes problemas de fabricación. Sin embargo, en las últimas propuestas [12], [13] se solucionan este problema utilizando pines con una altura reducida, con la desventaja de que de esta manera se tienen que utilizar pines en ambas tapas del dispositivo.

En este trabajo se va a proponer una topología de pines con altura reducida en únicamente una de las tapas del dispositivo, lo cual deja la otra tapa libre de pines, facilitando así el proceso de fabricación. También va a permitir utilizar puertos estándar en los dispositivos, lo cual facilita su integración en sistemas de guía de onda rectangular, ya que de esta manera se evita el empleo de transformadores o transiciones. Analizaremos el ancho de banda de funcionamiento de la estructura propuesta y, además, dicha estructura se va a comparar con algunas de las propuestas referenciadas anteriormente, con el objetivo de valorar sus prestaciones. Finalmente, se va a diseñar un filtro paso banda que será fabricado para ver cómo se comporta esta nueva topología en este tipo de dispositivos.

## II. GEOMETRÍA PROPUESTA

En la Fig. 2 se muestra una representación de la tecnología GGW convencional (altura de pines,  $h_c = \lambda/4$ ), la cual se ha modificado para incluir una base debajo de los pines con una altura  $b_c$ . De esta forma, es posible utilizar la altura teórica de pines habitualmente empleada ( $\lambda/4$ ) y conseguir la dimensión de puertos del estándar WR22 ( $W = 5.69$  mm,  $H = 2.845$  mm) que vamos a utilizar a lo largo de este trabajo. Además, en esta figura se observan el resto de parámetros que permiten definir esta tecnología:  $p$  (separación entre pines),  $r$  (tamaño de los

pinos) y  $g$  (gap o separación entre las piezas). Esta geometría nos proporciona el ancho de banda de funcionamiento requerido por este estándar de guía de onda rectangular (33 – 50 GHz) además de las ventajas de fabricación anteriormente mencionadas que proporciona la tecnología GGW.

Para facilitar el proceso de fabricación, resulta de gran interés reducir la altura de los pinos que determinan el correcto funcionamiento de esta tecnología. Al tener que mecanizar una profundidad menor, el tiempo de mecanizado se reduce considerablemente y, con ello, se reduce además el coste de fabricación. Para reducir esta altura, se han propuesto otras geometrías con altura de pinos reducidos [13], como la que puede observarse en la Fig.3. Esta configuración nos proporciona el ancho de banda de funcionamiento y las prestaciones de la GGW convencional y, además, facilita el proceso de fabricación, ya que la altura de estos pinos es menor,  $h_e$ . Por otro lado, esta geometría con pinos enfrentados aumenta la complejidad de la estructura ya que ambas tapas deben contener esta cama de pinos. Por lo tanto, la fabricación es más sencilla, pero es necesaria la mecanización de ambas piezas.

Con el objetivo de encontrar una geometría que mantenga las prestaciones de la tecnología GGW con altura de pinos convencional y de evitar la complejidad de fabricación que implica tanto los pinos de altura  $\lambda/4$  como tener pinos en ambas tapas del dispositivo, se ha hecho un estudio del comportamiento de la tecnología GGW con diferentes alturas de pinos. Aunque al reducir la altura de los pinos disminuye su ancho de banda de funcionamiento, se ha observado que es posible disminuir considerablemente esta altura (incluso hasta llegar a la altura  $h_e$ ) y seguir trabajando en el rango de operación de los estándares de guía de onda rectangular. Como resultado se muestra la geometría que proponemos en este trabajo y que se muestra en la Fig. 4. En esta configuración, la altura de los pinos,  $h_p$ , es reducida a la mitad de la convencional y solo tiene pinos en una de las piezas. Al igual que la GGW con altura de pinos convencional, tiene los mismos valores de gap,  $g$ , tamaño de pin,  $r$ , y espaciado entre pinos,  $p$ . Para modificar este parámetro sin modificar el gap ni la altura del puerto estándar  $H$ , se ha aumentado la altura de la base donde se asientan los pinos ( $b_p$ ) para contrarrestar esa modificación. Las dimensiones empleadas han sido:  $W= 5.69$  mm,  $H= 2.845$  mm,  $h_p= 0.9$  mm,  $g= 0.1$  mm,  $b_p=1.795$  mm,  $r= 1.56$  mm y  $p= 1.23$  mm. Para comprobar el ancho de banda de funcionamiento de esta estructura se ha realizado su diagrama de dispersión utilizando el Eigenmode solver de CST [14] (Fig. 5). En él se puede ver como la GGW propuesta permite la propagación en el ancho de banda requerido para la banda Q (WR22: 33-50 GHz).

Para evaluar las prestaciones de esta topología, se ha comparado su funcionamiento con el de la tecnología GGW con altura de pinos convencional y la tecnología GGW con pinos de altura reducida en ambas tapas del dispositivo (usando como material aluminio con conductividad  $3.56e07$  S/m). Se ha realizado la simulación en la banda Q de cada una de las topologías utilizando en CST Microwave Studio. Como se puede ver en la Fig. 6, las tres configuraciones tienen un funcionamiento similar en el ancho de banda de operación del estándar WR22, teniendo incluso unas pérdidas de inserción mejores en la tecnología propuesta en este trabajo (línea negra). Para confirmar estos resultados, se ha fabricado mediante CNC milling la geometría GGW con

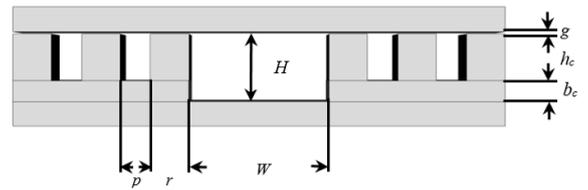


Fig. 2. Vista frontal de la tecnología GGW con altura de pinos convencional ( $h_c = 1.9$  mm).

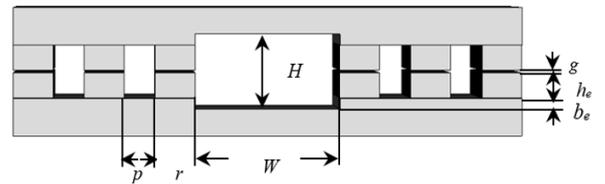


Fig. 3. Vista frontal de la tecnología GGW con pinos enfrentados ( $h_e = 0.95$  mm).

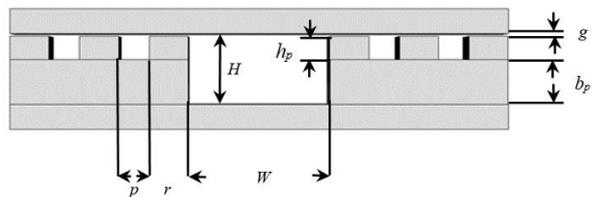


Fig. 4. Vista frontal de la geometría GGW propuesta ( $h_p = 0.95$  mm).

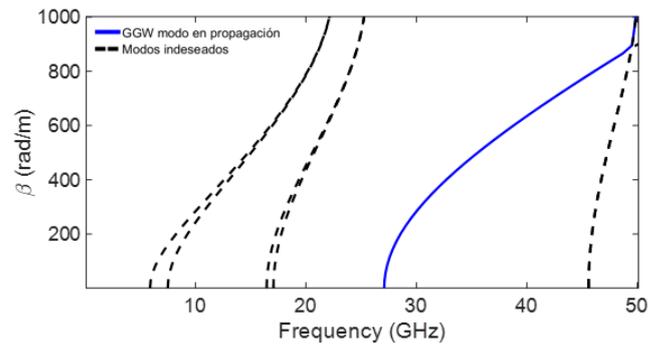


Fig. 5. Diagrama de dispersión de la geometría GGW propuesta.

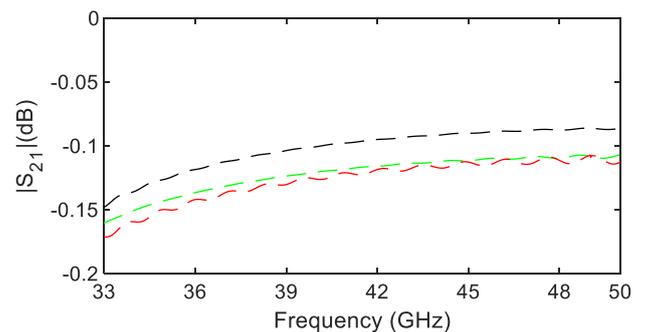


Fig. 6. Pérdidas de inserción de la tecnología GGW ( $W= 5.69$  mm,  $H= 2.845$  mm,  $g= 0.1$  mm,  $b=1.795$  mm,  $r= 1.56$  mm,  $p= 1.23$  mm) con altura de pinos convencional  $h_c = 1.9$  mm y  $b_c=0.845$  mm (línea verde), con pinos enfrentados  $h_e = 0.95$  mm y  $b_e=0.4225$  mm (línea roja), y geometría propuesta  $h_p = 0.95$  mm y  $b_p = 1.795$  mm (línea negra).

altura de pinos convencional (Fig. 8a) y la geometría propuesta de pinos con altura reducida (Fig. 8b). Los resultados obtenidos en medida confirman el funcionamiento y las conclusiones obtenidas en simulación de la geometría propuesta frente a la geometría clásica.

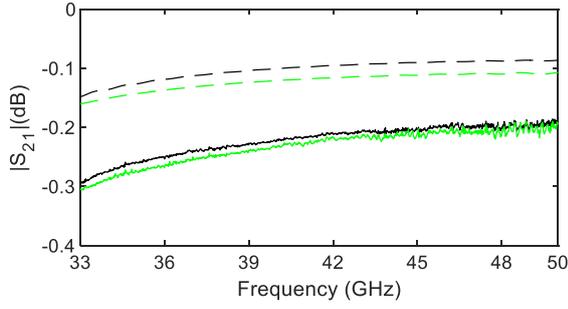
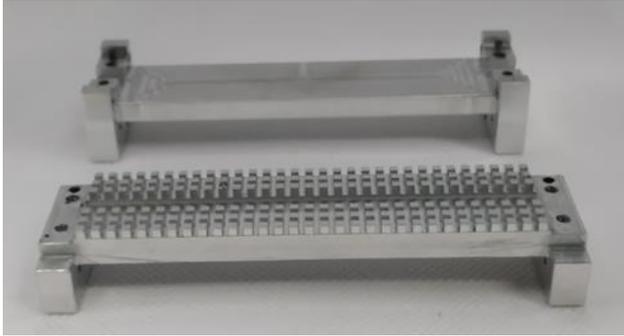
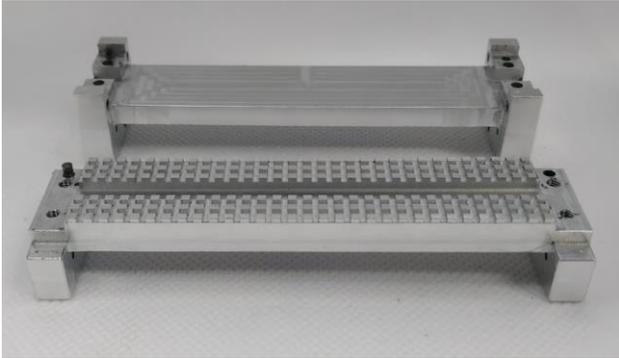


Fig. 7. Comparación de las pérdidas de inserción de la tecnología GGW ( $W=5.69$  mm,  $H=2.845$  mm,  $g=0.1$  mm,  $r=1.56$  mm,  $p=1.23$  mm) con altura de pines convencional  $h_c=1.9$  mm y  $b_c=0.845$  mm (línea verde), y geometría propuesta  $h_p=0.95$  mm y  $b_p=1.795$  mm (línea negra) La línea discontinua corresponde a la simulación obtenida con CST Microwave Studio y la línea continua a las medidas de los dispositivos fabricados.



(a)



(b)

Fig. 8. Guías de onda GGW fabricadas: (a) con altura de pines convencional y (b) geometría propuesta con pines altura reducida.

A la vista de los resultados obtenidos, podemos concluir que la geometría propuesta proporciona unas prestaciones más que suficientes para su empleo en el diseño de componentes en alta frecuencia.

### III. DISEÑO DE FILTRO PASO BANDA UTILIZANDO TECNOLOGÍA GGW CON ALTURA DE PINES REDUCIDA

Una vez confirmado el buen funcionamiento de la topología propuesta, en esta Sección se ha implementado un filtro con respuesta paso banda haciendo uso de ella. Para ello se explica en primer lugar el método de diseño utilizado y, a continuación, se muestran los resultados obtenidos.

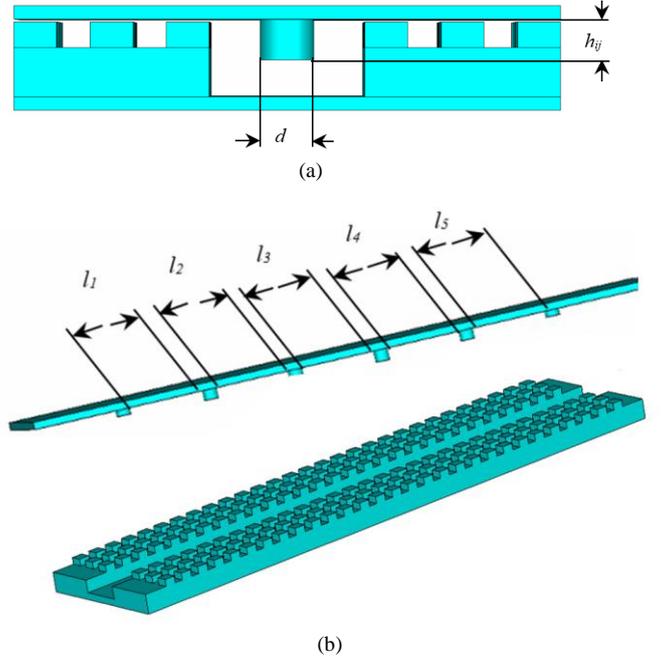


Fig. 9. Esquemático del filtro paso banda diseñado: (a) vista frontal y (b) vista de la cama de pines y los postes integrados en la tapa.

#### A. Método de diseño

El diseño del filtro paso banda se ha realizado utilizando resonadores acoplados mediante postes cilíndricos. Para ello, es necesario determinar en primer lugar los coeficientes de acoplo entre los resonadores ( $K_{i,i+1}$ ) y el factor de calidad ( $Q_{ext}$ ) tal y como se detalla en [15]:

$$K_{i,i+1} = \frac{BW}{\sqrt{g_i \cdot g_{i+1}}}, \quad i = 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

$$Q_{ext} = \frac{g_i \cdot g_{i+1}}{BW}, \quad i = 0, N \quad (2)$$

donde  $BW$  corresponde al ancho de banda fraccional del dispositivo,  $N$  al orden del filtro y  $g_i$  los coeficientes del prototipo paso bajo correspondiente. Para implementar el filtro se han utilizado resonadores en la tecnología GGW propuesta en este trabajo, ver Fig.9. Los acoplos han sido obtenidos mediante postes colocados entre los resonadores, donde todos los postes tienen el mismo diámetro,  $d$ , y se modifica su altura,  $h_{ij}$ , con el objetivo de alcanzar el acoplo deseado. Es importante destacar que estos postes se encuentran en la tapa superior de la estructura, con el objetivo de facilitar su fabricación, ya que en la cara inferior se encuentra la cama de pines.

#### B. Ejemplo

Se ha llevado a cabo un filtro paso banda Chebyshev utilizando la geometría propuesta con las siguientes especificaciones:

- 1) Frecuencia central de 39 GHz
- 2) Banda de paso de 38 a 40 GHz
- 3) Pérdidas de retorno de 20 dB
- 4) Orden,  $N=5$
- 5) Puertos estándar WR22 ( $W=5.69$  mm,  $H=2.845$  mm)

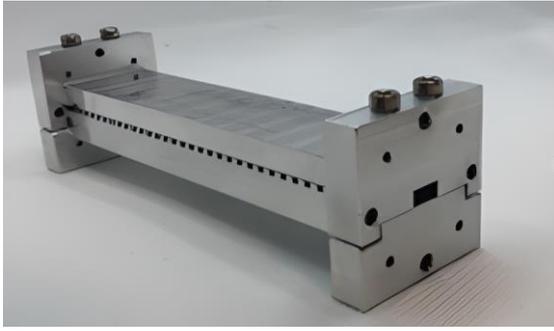


Fig. 10. Filtro paso banda fabricado.

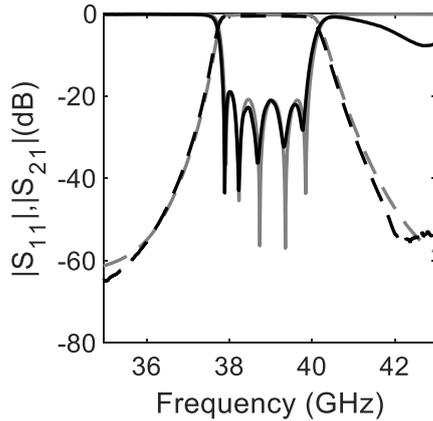


Fig. 11. Respuesta en frecuencia medida del filtro paso banda fabricado (línea negra) y respuesta en frecuencia simulada (línea gris).  $|S_{11}|$  en línea continua y el  $|S_{21}|$  en línea discontinua.

Con estas especificaciones, utilizando (1) y (2), se han calculado el factor de calidad externo y los coeficientes de acoplo necesarios para obtener la respuesta en frecuencia deseada:  $Q_{ext} = 26.04$ ,  $k_{12} = k_{45} = 0.044$ , and  $k_{23} = k_{34} = 0.033$ . Utilizando postes de diámetro  $d = 2$  mm, se han implementado estos valores con las siguientes alturas:  $h_{01} = h_{45} = 1.15$  mm,  $h_{12} = h_{34} = 1.68$  mm y  $h_{23} = 1.87$  mm, donde el  $h_{01}$  corresponde a la altura necesaria para llevar a cabo el acoplo entre el puerto de entrada o la fuente y la primera cavidad ( $Q_{ext}$ ),  $h_{12}$  al acoplo entre el primer y segundo resonador ( $k_{12}$ ),  $h_{23}$  al acoplo entre el segundo y el tercero ( $k_{23}$ ),  $h_{34}$  al acoplo entre el tercero y el cuarto ( $k_{34}$ ) y  $h_{45}$  al acoplo entre el último resonador y el puerto de salida o la carga ( $Q_{ext}$ ). Los resonadores tienen una longitud de  $l_1 = l_5 = 9.94$  mm,  $l_2 = l_4 = 9.82$  mm y  $l_3 = 9.81$  mm. Como resultado se obtiene el dispositivo que se muestra en la Fig.9b.

El filtro paso banda se ha fabricado mediante CNC milling (Fig. 10) y la medida de su respuesta en frecuencia se representa en la Fig. 11, justo con la respuesta simulada. Podemos ver que la respuesta en frecuencia medida se ajusta perfectamente a los resultados previstos en simulación.

#### IV. CONCLUSIÓN

En este trabajo se ha propuesto una nueva topología de pines para la tecnología GGW, la cual permite un proceso de fabricación más sencillo debido a la altura reducida de los pines empleados. Además, facilita su integración en sistemas de guía de onda rectangular, ya que mantiene los puertos estándar. Se ha comparado su respuesta en frecuencia con otras topologías existentes, comprobando que se obtienen prestaciones similares (con incluso mejores pérdidas de inserción) en el ancho de banda de operación del estándar de

guía utilizado. Finalmente, se ha empleado esta tecnología para implementar un filtro paso banda, cuya simulación y medida confirman su buen funcionamiento como alternativa a las tecnologías GGW existentes.

#### AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación –Agencia Estatal de Investigación (MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033) en el marco del proyecto PID2020-112545RB-C53.

#### REFERENCIAS

- [1] P.-S. Kildal, E. Alfonso, A. Valero-Nogueira, and E. Rajo-Iglesias, "Local metamaterial-based waveguides in gaps between parallel metal plates," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, 2009, pp. 84–87.
- [2] P.-S. Kildal, "Waveguides and transmission lines in gaps between parallel conducting surfaces." European Patent Application EP08159791.6, 7 July 2008.
- [3] A. Berenguer, V. Fusco, D. E. Zelenchuk, D. Sánchez-Escuderos, M. Baquero-Escudero, and V. E. Boria-Esbert, "Propagation characteristics of groove gap waveguide below and above cutoff," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 64, January 2016, pp. 27–36.
- [4] A. Berenguer, V. Fusco, M. Baquero-Escudero, and V. E. Boria Esbert, "A frequency-dependent equivalence between groove gap waveguide and rectangular waveguide," 2016 *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, Fajardo, PR, USA, 2016, pp. 1095–1096.
- [5] E. Rajo-Iglesias, M. Ferrando-Rocher, and A. U. Zaman, "Gap waveguide technology for millimeter-wave antenna systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 7, July 2018, pp. 14–20.
- [6] E. Rajo-Iglesias and P.-S. Kildal, "Numerical studies of bandwidth of parallel-plate cut-off realised by a bed of nails, corrugations and mushroom-type electromagnetic bandgap for use in gap waveguides," *IET Microwave, Antennas and Propagation*, vol. 5, Feb. 2011, pp. 282–289.
- [7] E. Rajo-Iglesias, and P. Kildal, "Groove gap waveguide: A rectangular waveguide between contactless metal plates enabled by parallel-plate cut-off," *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation*, Barcelona, Spain, 2010, pp. 1–4.
- [8] Miao Lv, Ze-Hong Yan, Wei Liu, and Yi-Bo Zhong, "Study of the characteristic of gap waveguide and comparison with rectangular waveguide," 2013 *International Workshop on Microwave and Millimeter Wave Circuits and System Technology*, 2013, pp. 72–75.
- [9] A. U. Zaman, V. Vassilev, P.-S. Kildal, and A. Kishk, "Increasing parallel plate stop-band in gap waveguides using inverted pyramid-shaped nails for slot array application above 60GHz," *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, 2011, pp. 2254–2257.
- [10] S. I. Shams and A. A. Kishk, "Double cone ultra wide band unit cell in ridge gap waveguides," *Proc. IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp. (APSURSI)*, Jul. 2014, pp. 1768–1769.
- [11] D. Sun, X. Chen, J. Deng, L. Guo, W. Cui, K. Yin, Z. Chen, C. Yao, and F. Huang, "Gap waveguide with interdigital-pin bed of nails for high-frequency applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, May 2019, pp. 2640–2648.
- [12] F. Fan, J. Yang, V. Vassilev, and A. U. Zaman, "Bandwidth investigation on half-height pin in ridge gap waveguide," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, January 2018, pp. 100–108.
- [13] F. Fan, J. Yang, and P. -S. Kildal, "Half-height pins - a new pin form in gap waveguide for easy manufacturing," *10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, April 2016, pp. 1–4.
- [14] CST Microwave Studio; <http://www.cst.com>.
- [15] R. Cameron, C. Kudsia, and R. Mansour, *Microwave Filters for Communication Systems*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018.