

# Estrategia de Diseño para Aumentar la Capacidad en Potencia en Guías de Onda Groove-Gap

Aitor Morales-Hernández<sup>(1)</sup>, Miguel Ferrando-Rocher<sup>(1)</sup>, Miguel Ángel Sánchez-Soriano<sup>(1)</sup>,  
Stephan Marini<sup>(1)</sup>, Vicente E. Boria<sup>(2)</sup>

aitor.morales@ua.es, miguel.ferrando@ua.es, miguel.sanchez.soriano@ua.es, smarini@ua.es, vboria@dcom.upv.es

<sup>(1)</sup>Instituto de Física Aplicada a las Ciencias y las Tecnologías, Universidad de Alicante, España.

<sup>(2)</sup>iTEAM, Universitat Politècnica de València, España

**Resumen**—This work describes a new design strategy for improving the power handling capability (PHC) of groove gap waveguides (GGW). First, a theoretical analysis is carried out to study the distribution of the quasi-TE<sub>10</sub> mode and the variation of the PHC for different configurations and frequencies. Then, in order to minimize the strength of the maximum electric field above the pins, three of the main geometrical dimensions of the nails are optimized. Finally, the numerical results show that by using this strategy, the corona discharge power thresholds can be enhanced without degrading the electrical response.

## I. INTRODUCCIÓN

El efecto corona ocurre cuando, en componentes con gas, se produce una avalancha de electrones ante campos electromagnéticos intensos [1]. Esta avalancha se crea cuando los electrones impactan con las moléculas de gas, causando ionización del mismo, y dando lugar a la aparición de un plasma que es capaz de degradar la respuesta del componente e incluso puede llegar a destruirlo.

La ionización es un problema grave en comunicaciones terrestres y por satélite cuando se necesitan niveles de potencia elevados. Debido a la aparición del efecto corona en dispositivos de microondas, durante la última década se ha realizado un gran esfuerzo para entender, modelar y precedir su aparición en guías de onda [2], [3] y en tecnología planar [4]–[6], por lo que es importante determinar cuáles son los niveles de potencia de RF a partir de los cuales se produce. Afortunadamente, la reciente aparición de potentes simuladores electromagnéticos ha facilitado su estudio.

En este trabajo, haciendo uso del simulador SPARK3D<sup>®</sup>, se evalúa mediante simulación la potencia de ruptura debida al efecto corona en guías de onda en tecnología gap waveguide (GW), y en concreto con estructura groove (GGW). GW es una tecnología que ha demostrado su gran potencial para confinar el campo en dispositivos que no están perfectamente sellados [7], [8]. Este trabajo estudia la posible aparición del efecto corona en las zonas de aire típicas de los dispositivos fabricados con esta tecnología. Es por ello por lo que se estudia la distribución del modo quasi-TE<sub>10</sub> y la capacidad de manejo de potencia (PHC) de estos dispositivos, así como también se compara con la correspondiente guía de onda rectangular (RW) equivalente. Finalmente, se propone una estrategia de diseño que permite mejorar notablemente la PHC debida al efecto corona en GGW.

## II. ANÁLISIS TEÓRICO

Una GGW se caracteriza normalmente por una estructura periódica de pines, habitualmente realizados con forma cua-

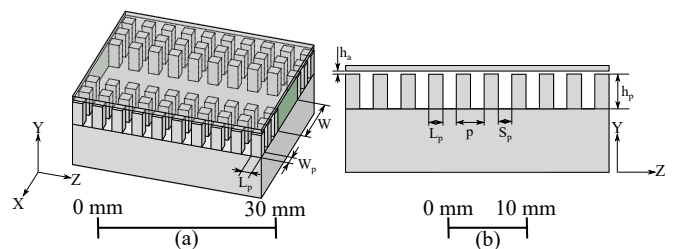


Fig. 1. Diseño para el análisis teórico. (a) Vista 3D. (b) Vista lateral.

drada debido a que su fabricación es más sencilla, y cuyo comportamiento da lugar a una banda prohibida (también denominada banda eliminada) para un determinado rango de frecuencias [9]. Las principales dimensiones geométricas de los pines ( $h_a$ ,  $W_p$ ,  $L_p$ ,  $p$  y  $h_p$  en la Fig. 1) determinan dicho comportamiento, por lo que es conveniente diseñarlos correctamente para centrar y ajustar el ancho de banda. Algunos estudios previos ya han analizado la influencia que cada una de estas dimensiones tiene sobre la banda prohibida, como se puede ver en [10].

El análisis teórico presentado en esta sección se ha llevado a cabo para una GGW, como la mostrada en la Fig. 1, que ha sido simulada haciendo uso de ANSYS HFSS para la obtención de los campos electromagnéticos en su interior. A continuación se presentará un estudio riguroso de cómo las dimensiones de los pines afectan notablemente a la distribución del modo quasi-TE<sub>10</sub> y a la PHC del dispositivo.

### A. Estudio de la distribución del modo quasi-TE<sub>10</sub>

De acuerdo con los resultados presentados en [11], se sabe que la distribución de campo en GGW es parecida a la del modo fundamental TE<sub>10</sub> de una guía RW. Sin embargo se pueden apreciar algunas diferencias en las características de propagación en función de la frecuencia de trabajo.

Para analizar el comportamiento de la distribución del modo quasi-TE<sub>10</sub>, primero es necesario evaluar la banda prohibida para una estructura periódica de pines con las siguientes dimensiones:  $p = 3.60$  mm,  $W_p = L_p = 1.88$  mm,  $h_p = 4.50$  mm y  $h_a = 0.40$  mm. El diagrama de dispersión obtenido se muestra en la Fig. 2, donde se destaca con una zona de color gris una banda eliminada entre 11.3 GHz y 27.9 GHz que cubre completamente las bandas Ku y K. En dicho rango de frecuencias se evitará la propagación de señal a través de la estructura de pines, mientras que el modo quasi-TE<sub>10</sub> sí podrá propagarse a través del surco realizado en el interior de dicha estructura.

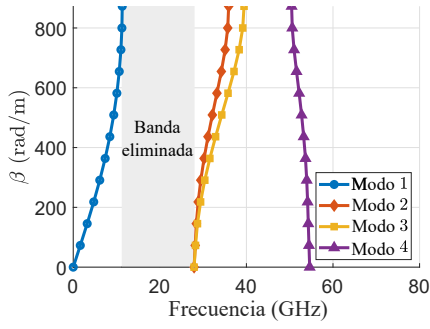


Fig. 2. Diagrama de dispersión:  $p = 3.60$  mm,  $W_p = L_p = 1.88$  mm,  $h_p = 4.50$  mm y  $h_a = 0.40$  mm.

Con el objetivo de representar la distribución del modo quasi- $TE_{10}$ , se ha diseñado y simulado una GGW como la mostrada en la Fig. 1(a), donde se ha hecho uso de las mismas dimensiones de pines especificadas anteriormente y se ha fijado el valor  $W = 10.67$  mm, este último correspondiente a una anchura estándar WR-42 ( $f_{cTE_{10}} = 14.05$  GHz). En la Fig. 3 se representa la componente normalizada  $|\hat{E}_y|$  para cuatro frecuencias distintas y a dos alturas diferentes, donde el primer plano queda localizado a  $y_1 = h_p + h_a/2$  (línea azul) y el segundo plano se sitúa a  $y_2 = h_p/2$  (línea roja), tal y como se especifica en la Fig. 3(a). Como se puede observar, para frecuencias en la zona inferior de la banda prohibida,  $|\hat{E}_y|$  es más intenso sobre la primera fila lateral de pines, mientras que para frecuencias superiores, el modo quasi- $TE_{10}$  aparece mejor confinado, y el valor máximo de campo eléctrico queda localizado en el centro de la guía de forma similar a la distribución  $TE_{10}$  de una guía RW.

Teniendo en cuenta estos resultados es posible observar que, cuando la frecuencia de trabajo está próxima al límite inferior de la banda prohibida, se puede esperar que la concentración de  $|\hat{E}_y|$  sobre los pines afecte negativamente a la PHC del dispositivo. Es por ello por lo que se considera importante definir un criterio de diseño para las dimensiones de los pines con el objetivo de ajustar el comportamiento de la banda prohibida, y así poder conseguir un modo quasi- $TE_{10}$  más confinado. En base a los resultados presentados, en la siguiente sección se estudiará la PHC de una GGW. Posteriormente, en la Sección III, se propone una estrategia de diseño para mejorar dicha capacidad en potencia.

### B. Estudio de la PHC

A partir de los resultados anteriores se hace evidente que aparecen lóbulos secundarios en el hueco de aire sobre la primera fila lateral de pines para frecuencias bajas de la banda prohibida. En consecuencia, este campo eléctrico intenso se espera que pueda degradar la capacidad en potencia de este tipo de dispositivos, tal y como se mostrará a continuación.

Para el estudio presentado en esta sección se han realizado distintos diseños como los de la Fig. 1(a) para todas las combinaciones posibles de  $h_p = \{3.00, 4.50, 6.00\}$  mm y  $h_a = \{0.20, 0.40, 0.60\}$  mm (fijando  $W = 10.67$  mm,  $p = 3.6$  mm y  $W_p = 1.88$  mm). Seguidamente se han simulado los campos electromagnéticos en HFSS y, a partir de ellos, se ha analizado la evolución de la densidad de electrones en el interior del componente mediante el uso de SPARK3D®. En todos los casos, la potencia de ruptura se ha simulado para aire seco, a una temperatura de 293 K, en todo el rango

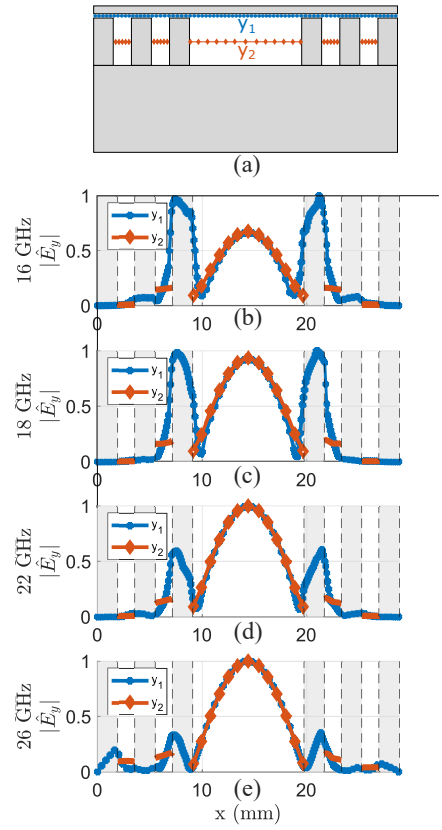


Fig. 3.  $|\hat{E}_y(x)|$  a diferentes frecuencias. (a) Plano X-Y simulado. (b) 16 GHz. (c) 18 GHz. (d) 22 GHz. (e) 26 GHz.

de presiones (entre 1 mbar y 1013 mbar) y para distintas frecuencias dentro de la banda eliminada definida en la Fig. 2, en la que se propaga el modo quasi- $TE_{10}$ .

Con el objetivo de simplificar los resultados, en la Fig. 4 se muestran las potencias de ruptura calculadas para distintas frecuencias y a una presión de 600 mbar, ya que ésta se considera dentro del rango de altas presiones. Es importante destacar que el parámetro  $h_a$  se fija para cada una de las gráficas, así como además cada color representa un valor diferente de  $h_p$ . Adicionalmente también se representan las potencias de ruptura de cada guía RW equivalente (líneas discontinuas), donde  $h_{RW} = h_p + h_a$ , con el fin de poder comparar con los valores obtenidos para guías GGW (líneas continuas). De los resultados de la Fig. 4 se destaca que:

- Valores más altos de  $h_p$ , para un valor fijo de  $h_a$ , dan lugar a un desplazamiento de la banda prohibida a frecuencias más bajas. Además, la PHC es también mayor, tal y como igualmente ocurre en una guía RW cuando se aumenta  $h_{RW}$ .
- Valores más bajos de  $h_a$ , para un valor fijo de  $h_p$ , dan lugar a anchos de banda mayores de la banda eliminada.
- La PHC de una GGW es más parecida a la de una guía RW para frecuencias altas de la banda prohibida, ya que aquí se disminuye el campo eléctrico de los lóbulos secundarios sobre la primera fila de pines, tal y como se ha mostrado en la Sección II-A.

### III. ESTRATEGIA DE DISEÑO PARA LA MEJORA DE LA PHC

A partir del estudio llevado a cabo en la Sección II, se evidencia que la capacidad en potencia de una GGW es

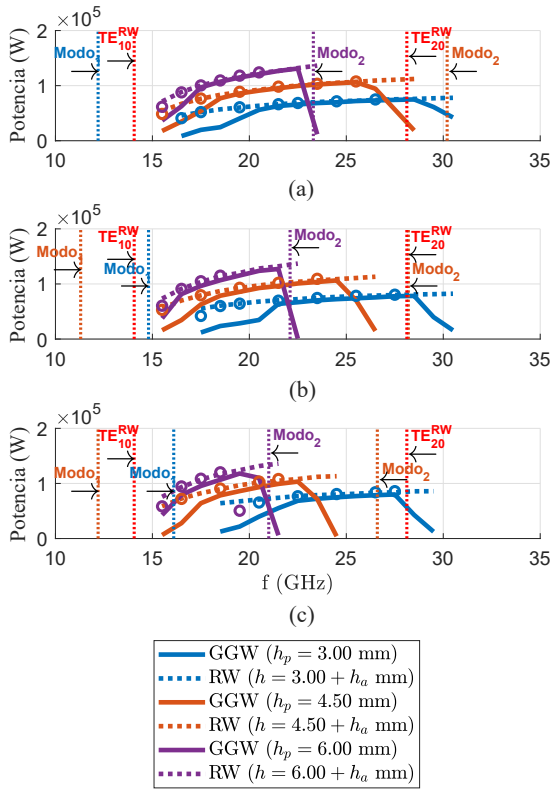


Fig. 4. Límite de potencia debido al efecto corona para diferentes frecuencias a 600 mbar. Se incluyen valores para guía rectangular (líneas discontinuas) y GGW (líneas continuas). Las líneas verticales punteadas se incluyen para indicar las frecuencias de corte de los modos  $TE_{10}^{RW}$  y  $TE_{20}^{RW}$ , así como la banda prohibida de cada diseño. Téngase en cuenta que los modos no incluidos se encuentran fuera de la banda entre 10 GHz y 35 GHz. Los círculos representan la potencia de ruptura mejorada cuando se aplica el criterio de diseño presentado en la Sección III. (a)  $h_a = 0.20$  mm. (b)  $h_a = 0.40$  mm. (c)  $h_a = 0.60$  mm.

inferior a la de una RW. Principalmente, esto ocurre sobre todo para frecuencias bajas de la banda eliminada, donde un modo quasi- $TE_{10}$  poco confinado da lugar a la aparición de un campo eléctrico intenso sobre la primera fila lateral de pines.

Con el objetivo de mejorar la PHC en las GGW, especialmente para frecuencias en la parte inferior de la banda prohibida, en esta sección se propone una estrategia de diseño. La idea principal de esta propuesta consistirá en el ajuste de las tres dimensiones principales de los pines [ver Fig. 1(b)]: la longitud  $L_p$  (a lo largo del eje Z), la anchura  $W_p$  (a lo largo del eje X) y la separación entre pines  $S_p$  (a lo largo de ambos ejes X y Z). Cabe tener en cuenta que la periodicidad a lo largo del eje Z es ahora  $p_z = L_p + S_p$ , mientras que en el eje X es  $p_x = W_p + S_p$ . A pesar de que normalmente los pines se realizan con forma cuadrada ( $L_p = W_p$ ), esta estrategia propone el diseño de pines rectangulares ( $L_p \neq W_p$ ).

#### A. Estudio de $W_p$ y $L_p$

En primer lugar se realizan distintos diseños como el mostrado en la Fig. 1(a) para todas las combinaciones posibles de  $W_p = \{0.90, 1.80, 2.70, 3.60, 4.50, 4.69, 5.40, 6.30\}$  mm y  $L_p = \{0.90, 1.80, 2.34, 2.70, 3.60\}$  mm (fijando  $W = 10.67$  mm,  $h_p = 4.50$  mm,  $h_a = 0.40$  mm y  $S_p = 1.72$  mm). Nuevamente, se ha hecho uso de SPARK3D<sup>®</sup> para obtener la potencia de ruptura a 600 mbar y a una frecuencia de trabajo de  $f = 16$  GHz, en la que previamente ya se ha comprobado la aparición de lóbulos secundarios de  $|\hat{E}_y|$  [ver Fig. 3(b)].

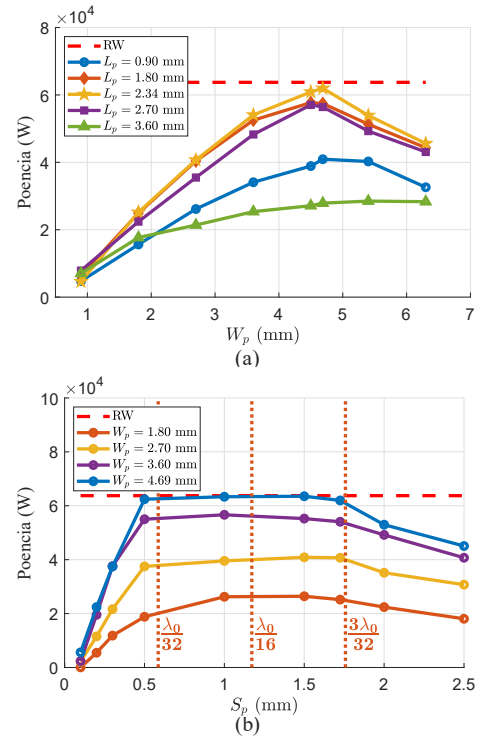


Fig. 5. Límite de la potencia de pico a 600 mbar y  $f = 16$  GHz. (a) Estudio de  $W_p$  y  $L_p$ . (b) Estudio de  $S_p$ .

Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 5(a), donde la potencia de ruptura se representa en función de  $W_p$  y cada curva representa un valor distinto de  $L_p$ . Tal y como se puede observar, la PHC es similar al de la guía RW equivalente cuando  $W_p = 4.69$  mm  $\approx \lambda_0/4$  y  $L_p = 2.34$  mm  $\approx \lambda_0/8$ . A partir de estos resultados uno puede asumir estas dimensiones como una primera aproximación del criterio de diseño para optimizar la potencia de ruptura en las GGW.

#### B. Estudio de $S_p$

Por último, la separación entre pines es otro posible parámetro de estudio. Nuevamente se han realizado y simulado múltiples diseños para distintos valores de  $S_p$  y  $W_p$ , donde ahora se ha fijado  $L_p = \lambda_0/8$ .

En la Fig. 5(b) se muestran los resultados obtenidos. Se puede observar que no es conveniente separar poco los pines entre sí, ya que puede aparecer campo eléctrico intenso entre ellos. Por otro lado, valores elevados de  $S_p$  darán lugar a un campo eléctrico poco confinado. Se puede ver que las máximas potencias de pico se alcanzan para valores de  $S_p$  comprendidos entre  $\lambda_0/32$  y  $3\lambda_0/32$ , por lo que el criterio de diseño podría establecerse a un valor central de  $S_p = \lambda_0/16$ .

#### C. Resultados

Tras llevar a cabo ambos estudios previos, se han obtenido una dimensiones optimizadas de  $W_p$ ,  $L_p$  y  $S_p$  con las que maximizar la potencia de ruptura de las GGW. Sin embargo, los resultados mostrados previamente se han simulado para una única frecuencia y unas dimensiones fijas de  $h_p$  y  $h_a$ , por lo que es necesario extender las simulaciones de la estrategia propuesta para otras posibles dimensiones y frecuencias.

En la Fig. 4, los círculos representan las potencias de pico para diferentes diseños y frecuencias en los que se ha aplicado el criterio propuesto. Se puede observar que, en la mayoría

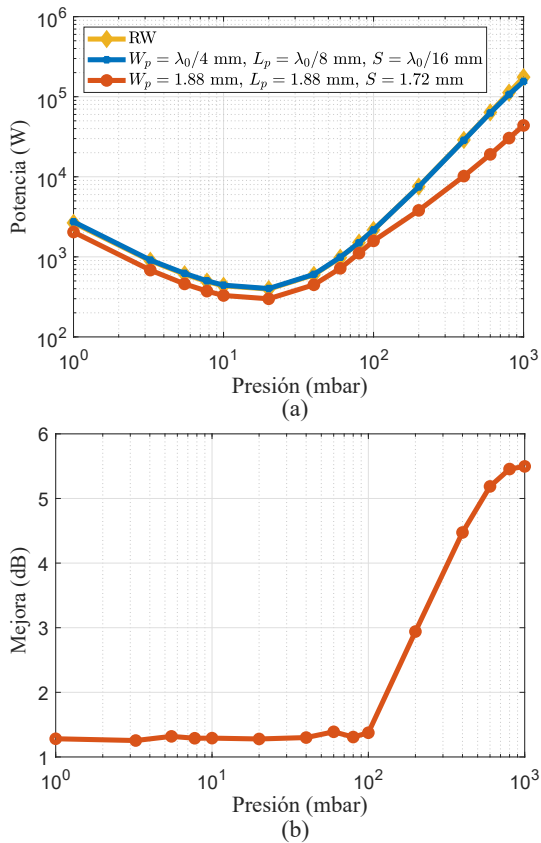


Fig. 6. (a) Curvas Paschen. (b) Mejora entre el diseño optimizado y no optimizado.  $f = 16$  GHz,  $h_p = 4.50$  mm y  $h_a = 0.40$  mm.

de los casos, la PHC de la GGW es similar a la de la guía RW equivalente, especialmente para valores bajos de  $h_p$  y  $h_a$ , donde además el criterio de diseño tiene más sentido. También es importante destacar que el ancho de banda es más estrecho cuando se utiliza el criterio propuesto (principalmente porque la frecuencia del modo superior se desplaza hacia abajo), por lo que esto explica la disminución de potencia en el ejemplo representado para  $h_p = 6$  mm,  $h_a = 0.6$  mm y  $f = 19.5$  GHz [ver Fig. 4(c)], donde el límite superior se ha sobrepasado. Por esta razón, es necesario llegar a un compromiso entre la mejora de la PHC y la reducción del ancho de banda, por lo que el uso del criterio de diseño es recomendable para frecuencias en la parte inferior de la banda prohibida con el fin de poder reducir los lóbulos secundarios sobre la primera fila de pines. Desde el punto de vista del diseñador, primero sería importante seleccionar una dimensiones adecuadas de  $h_p$  y  $h_a$  para fijar el ancho de banda donde el modo quasi-TE<sub>10</sub> se propague, y después, aplicar el criterio de diseño de  $W_p$ ,  $L_p$  y  $S_p$  para maximizar la potencia de ruptura del dispositivo.

Con el objetivo de validar la estrategia propuesta en todo el rango de presiones, en la Fig. 6(a) se representan las curvas Paschen para un diseño optimizado (línea azul) y no optimizado (línea roja). Además, como se puede ver en la Fig. 6(b), la mejora conseguida de la PHC es de en torno a 1.2 dB para bajas y medias presiones, llegando a alcanzar un valor de 5.5 dB a 1013 mbar.

Con el objetivo de validar la solución propuesta, se destaca que hay programada una campaña de medidas en el Laboratorio Europeo de Alta Potencia en Radiofrecuencia de la Agencia Espacial Europea ubicado en Valencia. Se espera que

los resultados puedan ser presentados en el congreso.

#### IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un nuevo criterio de diseño con el que mejorar la capacidad de manejo de potencia debida al efecto corona en las GGW. En primer lugar se ha estudiado la distribución del modo quasi-TE<sub>10</sub>, donde los resultados han mostrado una alta concentración de campo eléctrico sobre la primera fila lateral de pines para frecuencias bajas en la banda prohibida. A continuación, el análisis de la PHC para diferentes dimensiones de los pines ha mostrado que se consiguen valores más bajos en las GGW que en guías de onda convencionales, con la aparición de lóbulos secundarios. Finalmente, se ha realizado un estudio de los parámetros  $W_p$ ,  $L_p$  y  $S_p$  para obtener unas dimensiones óptimas de los pines que maximizan la potencia de ruptura de este tipo de dispositivos. Los resultados simulados han mostrado una mejora sustancial con el uso de la estrategia propuesta.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Universidad de Alicante mediante la beca de investigación UAFPU2018-054, y por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través de los proyectos de investigación PID2019-103982RB-C41 y PID2019-103982RB-C43.

#### REFERENCIAS

- [1] A. D. MacDonald, *Microwave breakdown in gases*. New York: Wiley, 1966.
- [2] C. Ernst and V. Postoyalko, "Prediction of peak internal fields in direct-coupled-cavity filters," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 51, no. 1, pp. 64–73, January 2003.
- [3] T. Pinheiro-Ortega, J. Monge, S. Marini, J. Sanz, E. Sorolla, M. Mattes, C. Vicente, J. Gil, V. Boria, and B. Gimeno, "Microwave corona breakdown prediction in arbitrarily-shaped waveguide based filters," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 20, no. 4, pp. 214–216, April 2010.
- [4] F. J. P. Soler, S. Anza, M. Mattes, C. M. España, F. Quesada, M. Jiménez, J. Gil, C. Vicente, J. Mosig, D. Raboso, V. E. Boria, B. Gimeno, and A. Álvarez-Melcon, "Rigorous investigation of RF breakdown effects in high power microstrip passive circuits," in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, June 2009, pp. 833–836.
- [5] M. Sánchez-Soriano, Y. Quéré, V. Le Saux, S. Marini, M. Reglero, V. Boria, and C. Quendo, "Peak and average power handling capability of microstrip filters," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 8, pp. 3436–3448, Aug 2019.
- [6] A. Morales-Hernández, M. A. Sánchez-Soriano, S. Marini, V. E. Boria, and M. Guglielmi, "Cover-ended resonators to increase corona discharge thresholds in microstrip bandpass filters," in *2020 50th European Microwave Conference (EuMC)*, 2021, pp. 882–885.
- [7] M. Baquero-Escudero, A. Valero-Nogueira, M. Ferrando-Rocher, B. Bernardo-Clemente, and V. E. Boria-Esbert, "Compact combline filter embedded in a bed of nails," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 4, pp. 1461–1471, April 2019.
- [8] M. Ferrando-Rocher, A. Valero-Nogueira, J. I. Herranz-Herruzo, A. Berenguer, and B. Bernardo-Clemente, "Groove gap waveguides: A contactless solution for multilayer slotted-waveguide array antenna assembly," in *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2016, pp. 1–4.
- [9] 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, pp. 14–20, July 2018.
- [10] M. Ferrando Rocher, "Gap waveguide array antennas and corporate-feed networks for mm-wave band applications," Ph.D. dissertation, Universitat Politècnica de València, 2019.
- [11] A. Berenguer, V. Fusco, D. Zelenchuk, D. Sánchez-Escuderos, M. Baquero-Escudero, and V. Boria-Esbert, "Propagation characteristics of groove gap waveguide below and above cutoff," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 64, no. 1, pp. 27–36, January 2016.