



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



DEPARTAMENTO DE
COMUNICACIONES



Máster Universitario
en Tecnologías, Sistemas y
Redes de Comunicaciones

Transición entre Guía de Onda Estándar y Suspended-Strip Gap-Waveguide para un Text-Fixture en banda Ka

Autor: Carlos Gahete Arias

Director: Mariano Baquero Escudero

Fecha de comienzo: 01/02/2011

Lugar de trabajo: Grupo de Radiación Electromagnética -
iTEAM

Objetivos – La exploración y el desarrollo de nuevas herramientas para el estudio de la nueva tecnología **Suspended-Strip Gap-Waveguide** constituyen el objetivo principal de este trabajo. Las tecnologías basadas en este concepto han empezado a ser desarrolladas en los últimos años, donde algunos diseños han sido fabricados y su viabilidad comprobada. Uno de los principales inconvenientes para el desarrollo de prototipos es la falta de transiciones hacia líneas de transmisión estándar, que se traduce en dificultades a la hora de realizar fabricaciones y mediciones a gran escala. El propósito de este trabajo se basa en el diseño y fabricación de un sistema de medida *test-fixture* para circuitos de microondas en esta tecnología, para su uso en la banda Ka, dotándolo para ello de una transición hasta guía de onda rectangular estándar.

Metodología – En primer lugar, el periodo de documentación ha permitido averiguar el estado del arte de la tecnología bajo análisis. El estudio teórico de algunos aspectos como la banda de frecuencias de uso de los dispositivos diseñados ha centrado los primeros pasos de la investigación. En cuanto a los resultados esperados, se han conseguido mediante el uso de software electromagnético simulando todos los prototipos diseñados para obtener su respuesta teórica ideal. El objetivo principal ha sido la comprobación empírica y la medición de los resultados reales de los prototipos para comprobar la fiabilidad del sistema. En este sentido, el trabajo de laboratorio ha sido muy importante, fabricando y midiendo un gran conjunto representativo de las muestras.

Desarrollos teóricos realizados – En las investigaciones realizadas y en los artículos hasta ahora publicados en referencia a la tecnología gap-waveguide, los análisis y verificaciones experimentales se han desarrollado para frecuencias comprendidas entre los 12 y los 18 GHz principalmente. No obstante, la utilización de este tipo de tecnología puede presentar mayores ventajas para su uso en bandas de frecuencia más elevadas. El ámbito de este trabajo se ha centrado en frecuencias entorno a los 40 GHz, y para ello ha sido necesario un estudio que permitiese trasladar el band-gap de utilización.

Desarrollo de prototipos y trabajo de laboratorio – Para el diseño del sistema test-fixture completo ha sido necesaria la fabricación de diversos componentes. El proceso se puede dividir en tres fases: la estructura metálica, los elementos de la transición y los circuitos de microondas que serán testeados. La estructura metálica ha sido fabricada mediante el fresado de una placa de aluminio en el centro de mecanizado del Laboratorio del Grupo Radiación Electromagnética (ITEAM). Los elementos correspondientes a la transición, formados por sustrato dieléctrico, también han sido mecanizados en el laboratorio del grupo de investigación. La parte correspondiente a los circuitos ha sido externalizada para asegurar la máxima precisión y fiabilidad en la fabricación. Una vez finalizado el montaje del test-fixture, cada circuito fabricado ha sido medido en el laboratorio mediante el uso del analizador de redes.

Resultados – Obtener los parámetros de dispersión de los circuitos diseñados para la tecnología Suspended-Strip Gap-Waveguide es el principal objetivo de los resultados de este trabajo. Inicialmente se han obtenido mediante la simulación de la estructura periódica los resultados que han permitido establecer el band-gap de frecuencias de uso de la estructura. Posteriormente se ha simulado toda la estructura de la transición ideada y ha sido necesaria la optimización de ciertos parámetros de la configuración. Los resultados teóricos de los circuitos diseñados también han sido obtenidos mediante simulación para así, después de la fabricación de todo el conjunto, poder comparar sus respuestas ideales con las medidas realizadas en el laboratorio.

Líneas futuras – En líneas generales, la incipiente tecnología Gap-Waveguide va a seguir precisando esfuerzos en el desarrollo de aspectos básicos para su integración con otros componentes activos y pasivos. La influencia de las estructuras de band-gap (EBG) en este tipo de realizaciones presenta dificultades a la hora de realizar algunos estudios que son de gran importancia para el desarrollo de métodos de análisis y síntesis. Además, serán necesarios más avances en el campo de las transiciones con otras tecnologías de alta frecuencia.

Publicaciones – El periodo de investigación de este Trabajo Fin de Master ha dado lugar a diversas publicaciones. Parte del trabajo realizado en los primeros meses fue presentado en el *XXVI Simposium Nacional de URSI* que tuvo lugar en Leganés en Septiembre de 2011, y en el *GAP Workshop* que tuvo lugar en la Universidad de Chalmers de Gotemburgo, Suecia, en Octubre de 2011. Como finalización a este periodo, se ha redactado un artículo para el *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* que en la fecha de presentación de este trabajo se encuentra a la espera del resultado de la revisión.

Abstract – The gap-waveguide technology is a new concept of transmission line that has emerged in the last few years. The basic idea of these kind of waveguides is to propagate a quasi-TEM mode along desired paths in the air gap between two metal surfaces and prohibits all other modes by making use of artificial magnetic conductors (AMC). This job presents a test-fixture for a suspended-strip gap-waveguide which provides a fast measurement system for prototyping stage. For this purpose it has been developed a transition from standard waveguide to this new technology. A TRL kit and a repeatability study have been made to ensure the reliability of the process and several straightforward circuits have been manufactured and measured.

Autor: Carlos Gahete Arias, [email: cargaar@teleco.upv.es](mailto:cargaar@teleco.upv.es)

Director: Mariano Baquero Escudero, [email: mbaquero@dc.com.upv.es](mailto:mbaquero@dc.com.upv.es)

Fecha de entrega: 17-09-2012

Índice

1. Introducción	4
1.1. Tecnología Gap-Waveguide	4
1.2. Tecnología Suspended-Strip Gap-Waveguide	6
2. Estudios teóricos	8
2.1. Tecnología Suspended-Strip Gap-Waveguide en banda Ka	8
2.2. Estimación de la impedancia característica	9
3. Diseño del sistema Test-Fixture	11
3.1. Transición guía de onda rectangular - Suspended-Strip Gap-Waveguide . .	11
3.2. Diseño de circuitos Suspended-Strip Gap-Waveguide para el Test-Fixture. .	13
4. Fabricación de prototipos	16
5. Medidas y resultados	18
5.1. Kit de calibración TRL	18
5.2. Estudio de repetibilidad	19
5.3. Resultados	20
5.3.1. Líneas de transmisión	20
5.3.2. Divisores de potencia de 2 salidas	23
5.3.3. Divisores de potencia de 3 salidas	26
6. Conclusiones	30
7. Líneas futuras	30
A. Artículos	32
A.1. XXVI Simposium Nacional - URSI 2011	32
A.2. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters	32

1. Introducción

1.1. Tecnología Gap-Waveguide

La tecnología de guía de ondas es utilizada para la realización de circuitos de microondas y sistemas de comunicaciones que requieren bajas pérdidas. Esta tecnología se caracteriza por ofrecer unas excelentes prestaciones de blindaje electromagnético, unos factores de calidad altos y una gran capacidad para transportar señales de alta potencia. Sin embargo, las soluciones que ofrece presentan el inconveniente de resultar pesadas, voluminosas y difíciles de manejar e integrar con otros dispositivos. Además, para frecuencias por encima de los 30 GHz comienzan a experimentarse algunos problemas de fabricación debido a las reducidas dimensiones de las guías, lo que requiere un esfuerzo adicional para que las uniones mecánicas proporcionen buenos contactos eléctricos. Por otra parte, en muchas aplicaciones en la banda de frecuencias mencionada se suele utilizar tecnología planar como, por ejemplo, las líneas microstrip. A pesar de las múltiples ventajas que supone trabajar con tecnología planar, como su reducido peso y volumen compacto, bajo coste y procesos de fabricación precisos, el incremento de las pérdidas a medida que aumentamos la frecuencia y sus limitaciones para trabajar con potencias elevadas hacen que no sean adecuadas para determinadas aplicaciones.

La tecnología Gap-Waveguide es un nuevo concepto de línea de transmisión para las bandas milimétrica y sub-milimétrica introducido en los últimos años y basado en el uso de estructuras periódicas [1], [2] y [3]. Estas estructuras, a menudo conocidas como metamateriales, son capaces de obtener comportamientos electromagnéticos anormales [4], como superficies conductoras magnéticas artificiales (AMC). Como muestra la figura 1, en el caso de la tecnología Gap-Waveguide la síntesis de dichas superficies se realiza típicamente a través de una base de pines metálicos de longitud L incrustados en sustrato dieléctrico (en general, aire) de permitividad ϵ_h . Estos pines se encuentran conectados a un plano conductor eléctrico perfecto (PEC), y espaciados una longitud a entre sí [5].

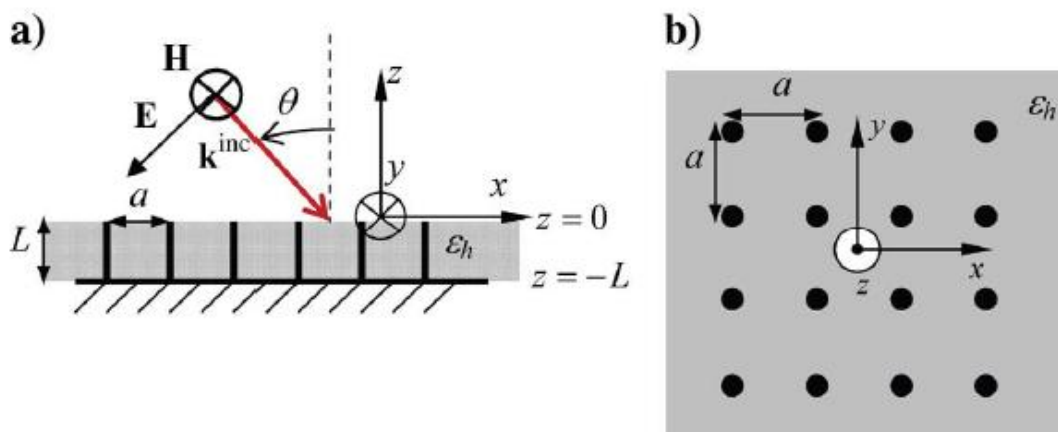


Figura 1: Síntesis de una superficie AMC. Vista lateral(a) y cenital(b)

La geometría básica de estas nuevas guías Gap-Waveguide se muestra en la configuración de la figura 2. La parte superior de la estructura la constituye una superficie plana conductora perfecta (PEC). La parte inferior está compuesta de una superficie PEC (ridge) embebida en una estructura periódica que se comporta como un plano magnético conductor (PMC).

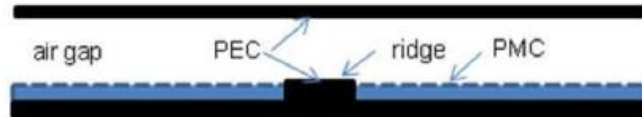


Figura 2: Geometría básica de una estructura Gap-Waveguide.

En la separación de las partes superior e inferior se forman un pequeño hueco (aire) que tomará un valor menor que $\lambda/4$. La zona comprendida entre las dos superficies PEC se encarga de guiar el campo electromagnético y mantenerlo confinado a lo largo de la línea, asimismo, la zona comprendida entre la superficie superior PEC y la superficie PMC evita la propagación en cualquier otra dirección. Esta configuración Ridge Gap-Waveguide ha sido analizada en varios estudios determinando algunas de sus propiedades, como la impedancia característica [6], [7] y [8]. Además, se ha verificado experimentalmente mediante el diseño de diversos circuitos de microondas [9], [10] y [11]. En la figura 3 se observan la geometría y las dimensiones de una Ridge Gap-Waveguide [2].

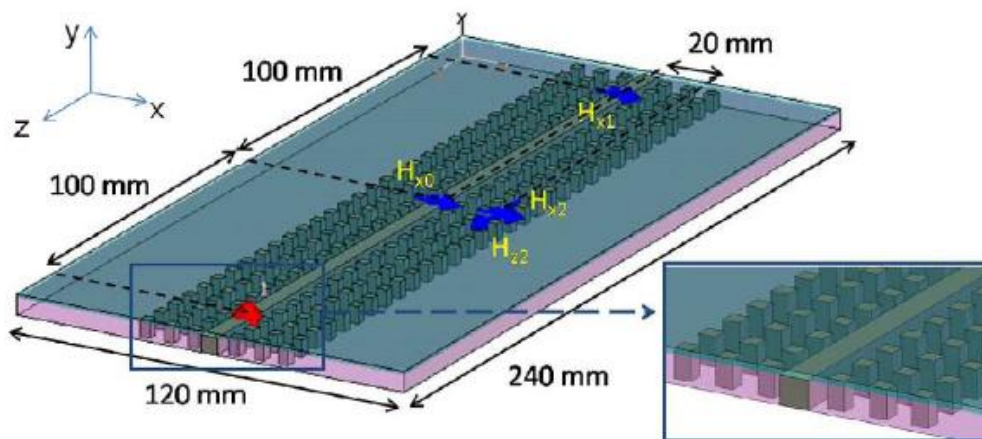


Figura 3: Geometría y dimensiones de una línea Ridge Gap-Waveguide.

El diagrama de dispersión de la figura 4 muestra que la estructura es capaz de guiar un solo modo quasi-TEM en el band-gap existente entre aproximadamente 10 y 19 GHz.

Las estructuras Gap-Waveguide, por tanto, pueden ser realizadas sin la necesidad de emplear dieléctricos, lo que supone la ventaja frente a los circuitos fabricados en tecnología

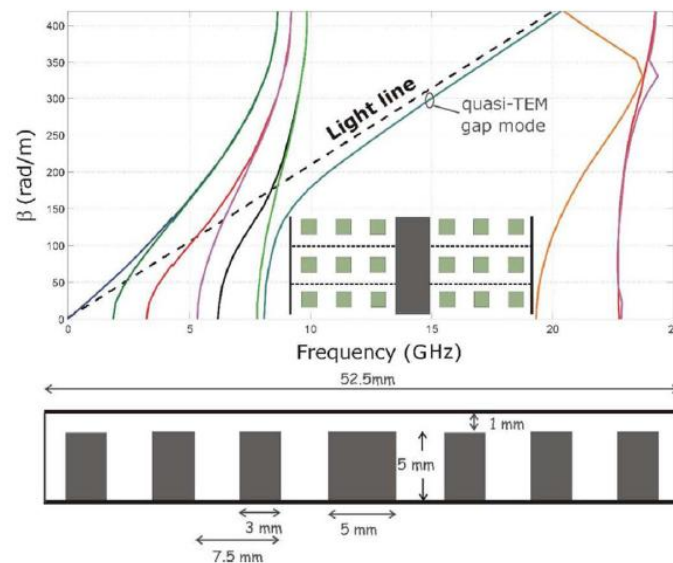


Figura 4: Diagrama de dispersión de la guía Ridge Gap-Waveguide.

planar de obtener menores pérdidas. A su vez, las pérdidas y factores de calidad obtenidos en comparación con la tecnología de guía de ondas son muy similares [12]. Por otra parte, este tipo de guías disponen de una ventaja en cuanto a la fabricación debido a que no es necesario ningún tipo de contacto entre las piezas de metal que forman la parte superior e inferior de la guía. Además, la tecnología Gap-Waveguide puede ser utilizada para de solucionar los problemas de resonancia que aparecen al empaquetar circuitos pasivos y activos basados en líneas microstrip y coplanar [13].

1.2. Tecnología Suspended-Strip Gap-Waveguide

La geometría descrita para las guía Ridge Gap-Waveguide presenta un inconveniente desde el punto de vista de la fabricación. El uso de una estructura maciza metálica embebida sobre la base de pines para conseguir la superficie PEC inferior, supone la recolocación de la base de pines de su alrededor para cada circuito a fabricar. Esto puede resultar excesivamente costoso desde el punto de vista de tiempo y recursos, especialmente en la fase de fabricación de prototipos. Recientes estudios han presentado una realización práctica alternativa, basada en una tira de cobre suspendida sobre la base de pines periódica [14] y [15].

Como se muestra en la figura 5, esta configuración sustituye la estructura de metal ridge por una tira de cobre impresa sobre una fina lámina flexible de dieléctrico. En este caso, la base de pines periódica forma una matriz completamente regular independiente del tipo de circuito que se quiera implementar, e implica la posibilidad de reutilizar la estructura periódica para la banda de frecuencias soportada colocando distintos circuitos impresos. Evidentemente eso supone una ventaja en términos de tiempo y coste de fabricación.

La estructura sigue manteniendo la idea básica de la guía Ridge Gap-Waveguide, donde

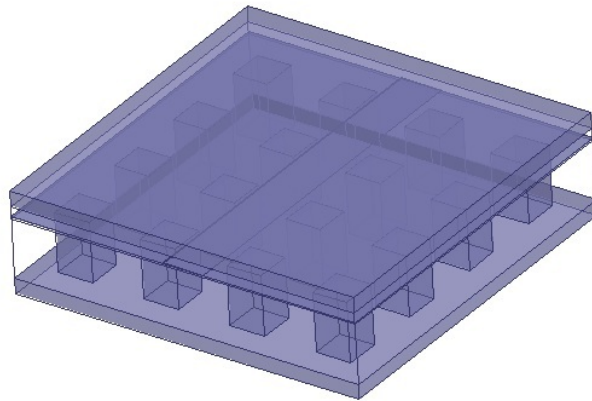


Figura 5: *Realización práctica de una Suspended-Strip Gap-Waveguide.*

se distinguen claramente dos regiones:

- PEC sobre PEC: Es la región formada entre la tira de cobre y la superficie PEC superior.
- PEC sobre PMC: Es la región formada entre la superficie PMC sintentizada por la base de pines periódica y la superficie PEC superior.

El objetivo de este trabajo se centra en el diseño y fabricación de un sistema de medición para prototipos de circuitos de microondas en la tecnología Suspended-Strip Gap-Waveguide, para operar en banda Ka, que proporcione un montaje y desmontaje rápido y sin soldaduras de los circuitos impresos sobre la base de pines.

2. Estudios teóricos

2.1. Tecnología Suspended-Strip Gap-Waveguide en banda Ka

Las dimensiones de las estructuras periódicas, como la base de pines utilizada en la tecnología Gap-Waveguide, establecen el band-gap de frecuencias de operación en el que será posible la utilización de la estructura como línea de transmisión. En los artículos hasta ahora mencionados, los análisis y verificaciones experimentales se han desarrollado para frecuencias comprendidas entre los 12 y los 18 GHz. No obstante, la utilización de este tipo de tecnología puede presentar mayores ventajas para su utilización en la banda de frecuencia que va desde 30 GHz hasta los Terahercios, donde existe una falta de tecnologías totalmente adecuadas para el desarrollo de ciertas aplicaciones y donde las guías Gap-Waveguide pueden ser una buena solución. En primer lugar, por tanto, es preciso trasladar el band-gap de la estructura para poder trabajar en torno a una frecuencia de operación más elevada, que en nuestro caso será de 36.85 GHz, mediante un escalado de las dimensiones.

La figura 6 muestra una sección transversal de la geometría que se ha considerado para el estudio de la guía Suspended-Strip Gap-Waveguide. La tira de cobre que forma la superficie PEC inferior es de $35 \mu\text{m}$ de grosor y tiene una anchura (w) de 1.4 mm. La delgada lámina dieléctrica sobre la que está impreso el circuito presenta $50 \mu\text{m}$ de espesor y una permitividad relativa de $\epsilon_r = 3,6$.

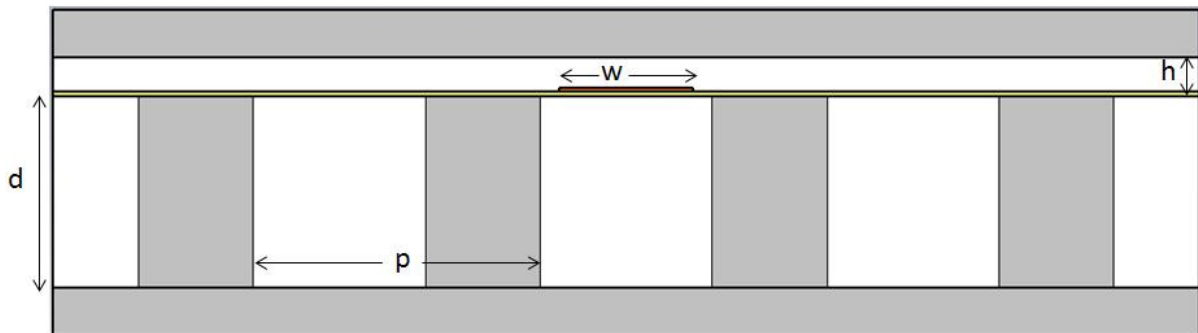


Figura 6: Geometría considerada para la guía Suspended-Strip Gap-Waveguide.

El diagrama de dispersión para la geometría descrita se muestra en la figura 7. La base de pines está formada por postes de sección cuadrada de 1.2 mm de lado, una altura (d) de 2 mm y una separación (p) entre ellos de periodicidad 3 mm. El hueco de aire (h) entre la superficie superior y la superficie inferior es de 0.4 mm.

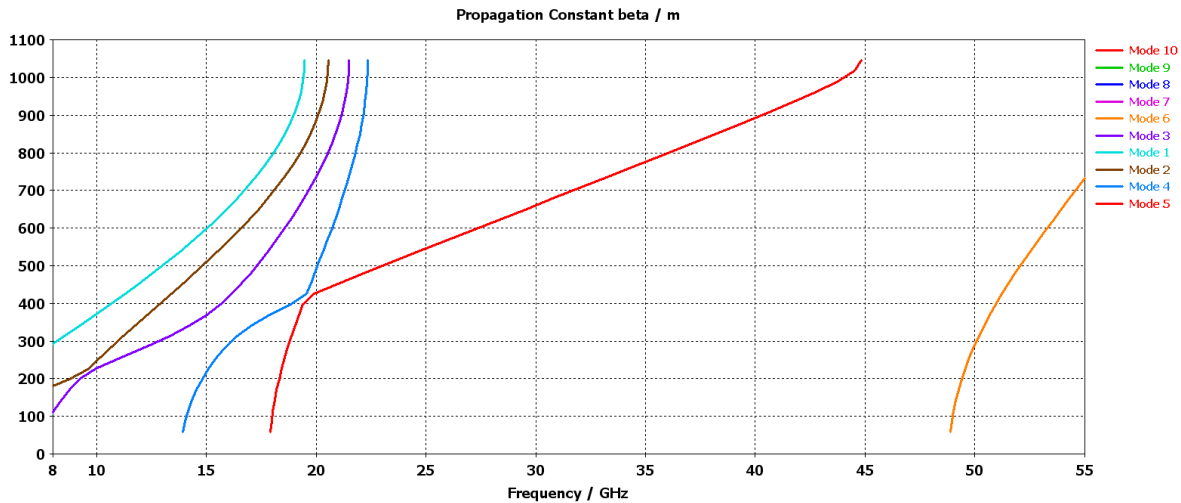


Figura 7: Diagrama de dispersión obtenido para la geometría de la figura 6.

Las simulaciones se han llevado a cabo mediante CST Eigenmode Solver. Se observa que existe un solo modo quasi-TEM propagándose en la banda entre 23 y 48 GHz, mientras los demás modos están al corte en esa banda de interés.

2.2. Estimación de la impedancia característica

La configuración PEC/PMC en la que se basa en funcionamiento de la tecnología Gap-Waveguide, donde se permite la propagación a lo largo de las superficies PEC mientras que en cualquier otra dirección se detiene, es similar a la de una línea microstrip invertida como la que se puede ver en la figura 8.

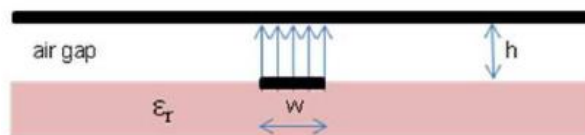


Figura 8: Geometría de una microstrip invertida.

De esta manera, muchas de las ecuaciones que describen el comportamiento electromagnético de las líneas microstrip invertidas aplicarán como buena aproximación a las guías Gap-Waveguide dentro del band-gap en el que la superficie magnética artificial se comporta como una superficie PMC. De forma esquemática y mediante la aplicación de teoría de imágenes, es posible obtener un equivalente stripline de esta configuración como el que se muestra en la figura 9, de donde se deduce que idealmente se puede aproximar la impedancia de una guía Gap-Waveguide como:

$$Z_{\text{Gap-Waveguide}} = 2Z_{\text{stripline}}$$

donde $Z_{stripline}$ es la expresión de la impedancia característica conocida para una línea stripline [16].

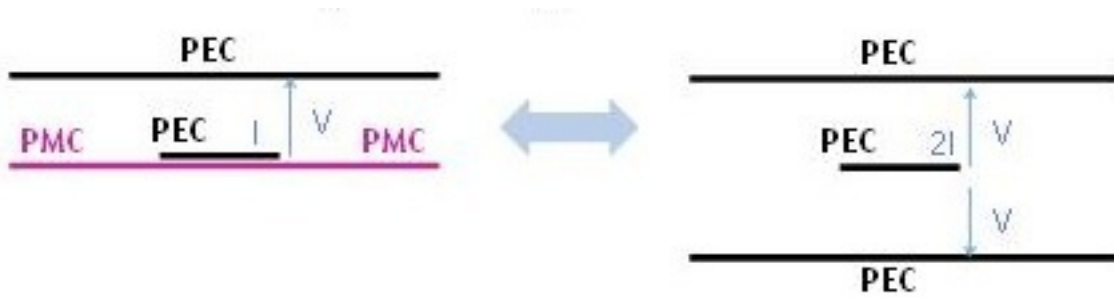


Figura 9: *Equivalente stripline de la tecnología Gap-Waveguide mediante teoría de imágenes.*

Según esto, en la figura 10 se observa la distribución de impedancias características calculadas con respecto a la relación w/h , donde w representa la anchura de la tira conductora y $h=0.4$ mm el hueco entre las superficies superior e inferior de la Suspended-Strip Gap-Waveguide. Estos valores son los que se han considerado como referencia para el diseño de los circuitos que se presentarán a lo largo del trabajo.

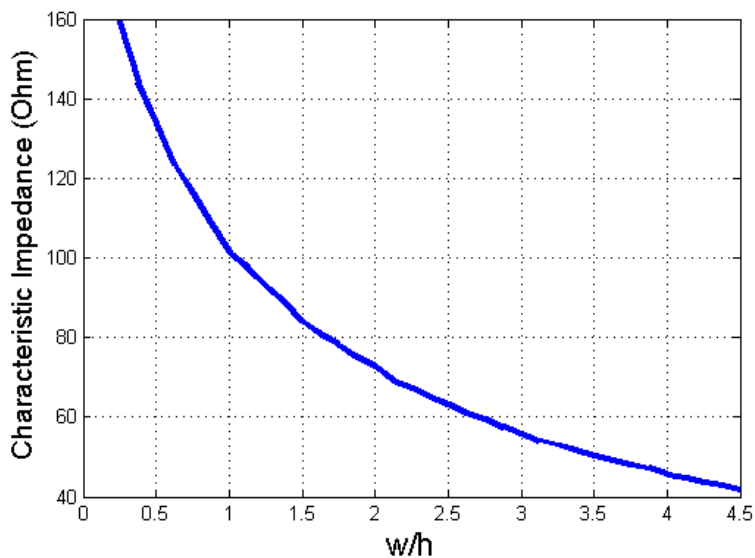


Figura 10: *Impedancia característica del equivalente stripline.*

3. Diseño del sistema Test-Fixture

3.1. Transición guía de onda rectangular - Suspended-Strip Gap-Waveguide

Uno de los pasos más importantes a la hora de poder medir la guía Suspended-Strip Gap-Waveguide presentada es diseñar una transición que nos permita la conexión a los aparatos de medida mediante líneas estandarizadas. En nuestro caso se ha optado por realizar una transición a la guía de onda rectangular estándar WR28, cubriendo así el rango de frecuencias entre 26.5 y 40 GHz. La idea principal es crear un canal desde la guía Suspended-Strip Gap-Waveguide mediante un coaxial rectangular para penetrar en la guía de onda. En primer lugar, la tira de cobre procedente de la Suspended-Strip Gap-Waveguide se inserta en el coaxial rectangular con una anchura de 0.57 mm. En el otro extremo, el conductor interior del coaxial penetra en la guía de onda una longitud de 1.67 mm. También una parte del dieléctrico del coaxial rectangular ($\epsilon_r = 2,2$) penetra en la guía de onda, dándole así a la estructura una mayor rigidez. Por último, el conductor que penetra en la guía de onda se halla a una distancia del cortocircuito de 1.7 mm. Todas las dimensiones han sido optimizadas mediante simulaciones realizadas en HFSS para obtener una buena adaptación entre la guía de onda y la guía Suspended-Strip Gap-Waveguide en torno a la frecuencia de trabajo de 36.85 GHz. En la figura 11 se muestra el detalle de la configuración. Además se observa como la transición con el coaxial rectangular está realizada en forma de sandwich y el ensamblado se produce por presión sin necesidad de soldadura con la Suspended-Strip Gap-Waveguide.

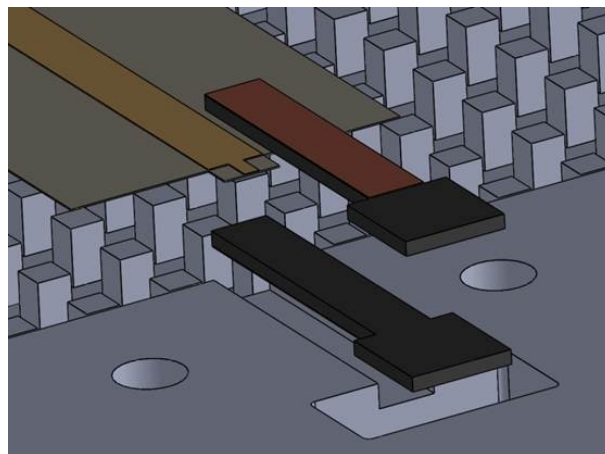


Figura 11: Configuración de la estructura que forma el canal de la transición.

Como referencia, las dimensiones de coaxial rectangular han sido escogidas para obtener una impedancia característica de 50Ω . Para ello, la anchura ($w_{channel}$) y altura ($h_{channel}$) del coaxial rectangular es de 2 mm y 1.121 mm, respectivamente. El conductor interior tendrá una anchura (w_{rc}) de 0.77 mm. Se puede ver un detalle de las dimensiones en la figura 12.

3.1 Transición guía de onda rectangular - Suspended-Strip Gap-Waveguide

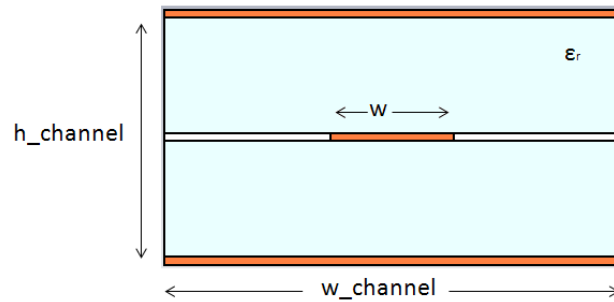


Figura 12: *Detalle del coaxial rectangular que forma el canal de la transición.*

En la figura 13 se muestra la geometría de la simulación correspondiente a la transición sin la línea Suspended-Strip, es decir, la parte que comprende la conexión entre la guía WR28 y el coaxial rectangular.

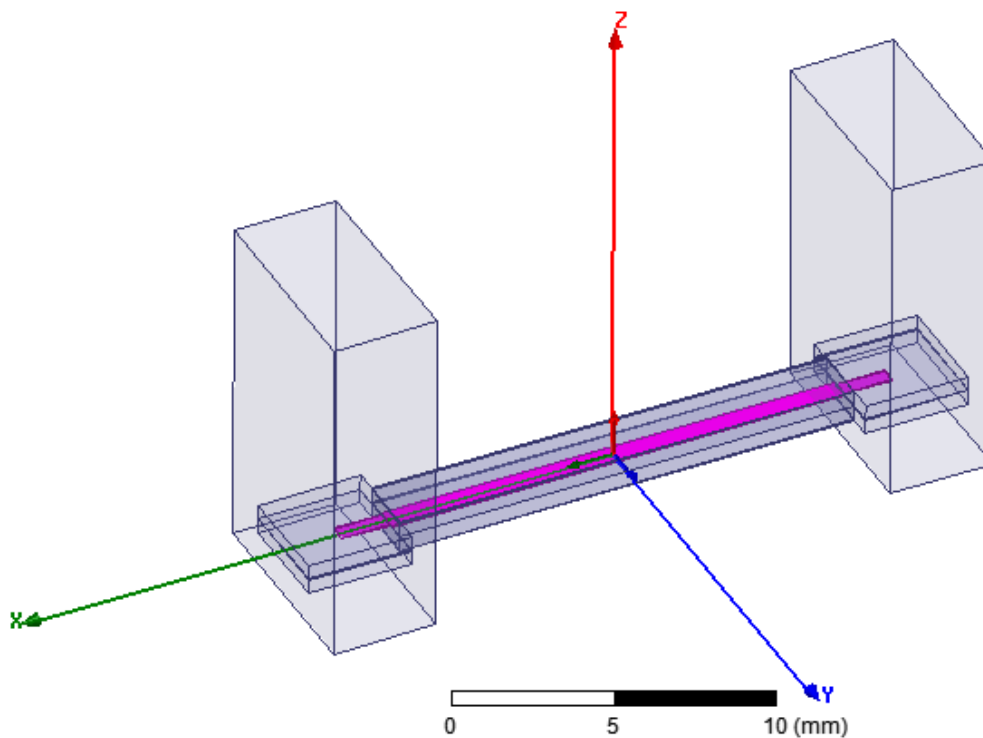


Figura 13: *Transición WR28 - coaxial rectangular.*

Los parámetros de dispersión de esta parte de la transición se muestran en la figura 14. El coeficiente de reflexión en la banda comprendida entre 34 y 38 GHz se mantiene por debajo de -20 dB y las pérdidas introducidas se mantienen entorno a los 0.2 dB.

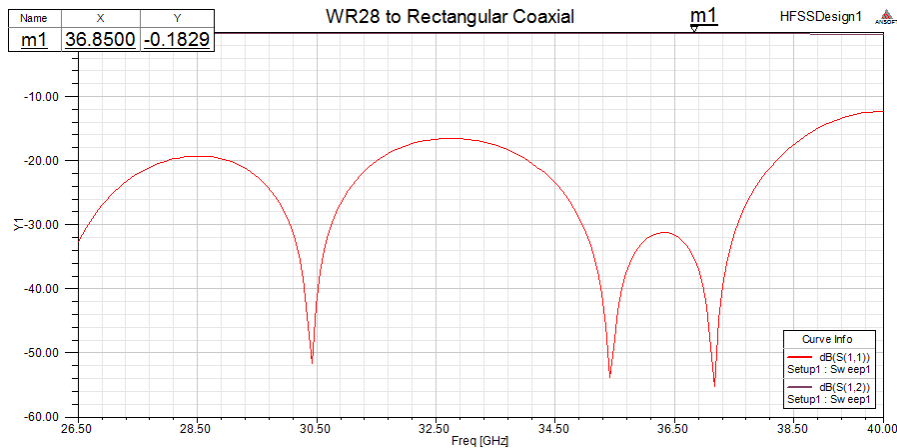


Figura 14: Parámetros de dispersión de la transición WR28 - coaxial rectangular.

3.2. Diseño de circuitos Suspended-Strip Gap-Waveguide para el Test-Fixture.

La base de pines diseñada para del sistema test-fixture se muestra en la figura 15. Es de base cuadrada de 48 mm de lado y está formada por un conjunto de 16 x 16 pines metálicos que sintentizarán la suferficie PMC.

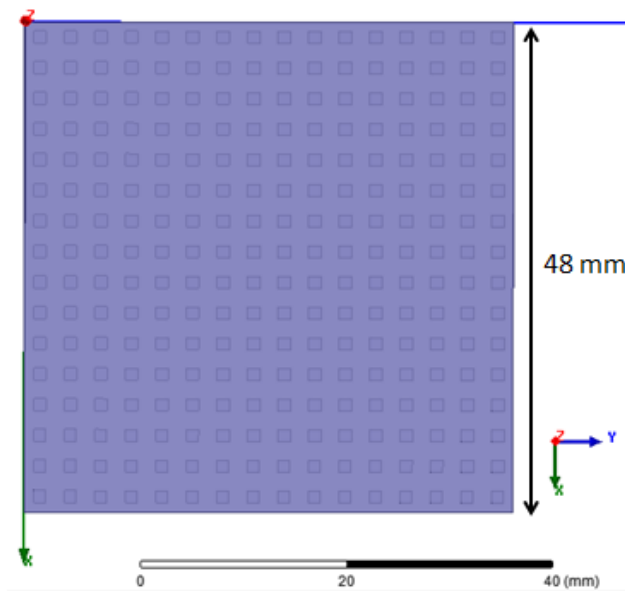


Figura 15: Base de pines del sistema test-fixture.

El canal creado para formar la transición será de longitud $l=7.747$ mm, esta longitud permitirá que a la hora de hacer el montaje completo no exista ningún problema en la conexión con las bridas de las guías WR-28.

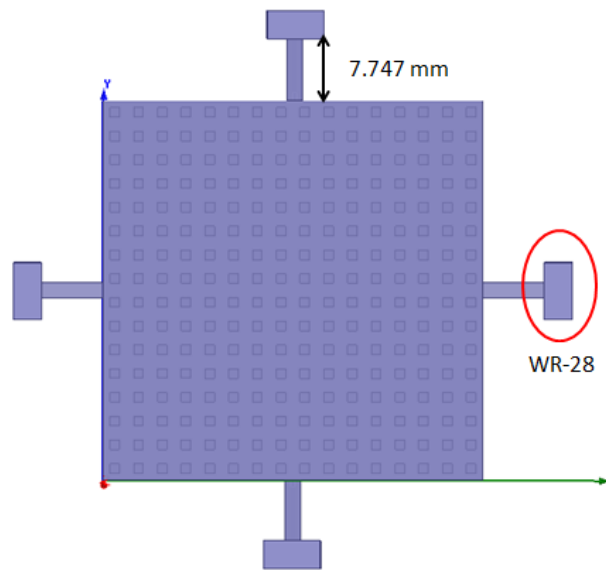


Figura 16: Base de pines con el sistema ideado para la transición.

El conjunto de circuitos diseñados se compone de líneas de transmisión y divisores de potencia. Las líneas de transmisión son rectas y conectan dos puertos enfrentados de los cuatro de los que dispone el test-fixture. La figura 17 muestra una línea sobre sustrato dieléctrico donde se aprecia una pequeña pestaña que es la que se introduce en el canal de la transición. En el grupo de líneas diseñadas se ha variado el ancho de la línea metálica (w) para obtener líneas de diferente impedancia característica.

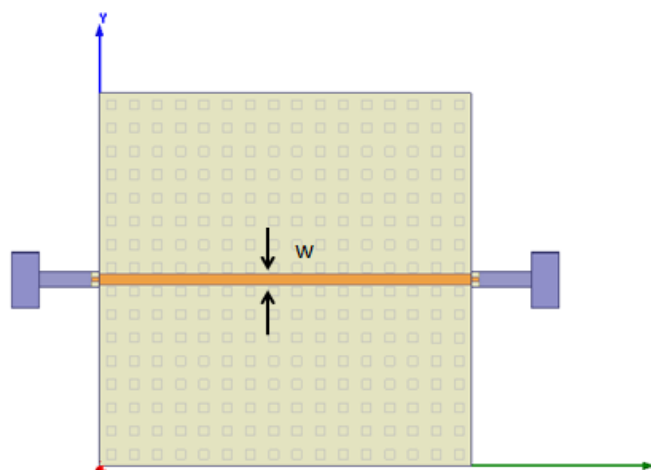


Figura 17: Línea de transmisión en el test-fixture.

Los divisores de potencia de dos salidas acceden por un lado del test-fixture y toman una configuración en forma de T para salir perpendicularmente por los dos accesos de los laterales. La anchura de las líneas de los accesos se ha fijado a $w=1.40$ mm, mientras

que las línea en la zona de la división (ws1 y ws2) establecen con su anchura la cantidad de potencia que se canaliza por cada salida. La figura 18 muestra el circuito de un divisor de dos salidas montado en el test-fixture.

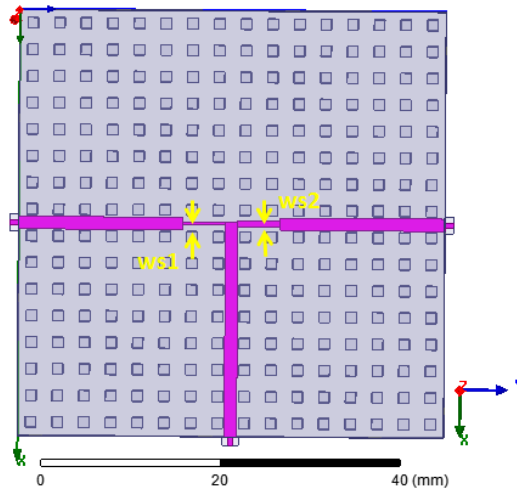


Figura 18: Divisor de dos salidas en el test-fixture.

En los divisores de potencia de tres salidas se accede por un lado del test-fixture de la misma manera que en los divisores de dos salidas. Como muestra la figura 19, la división toma una configuración en forma de árbol donde dos de las salidas acceden perpendicularmente a los puertos laterales y la tercera lo hace en el puerto que enfrenta al acceso de entrada. La anchura de las líneas de los accesos también se ha fijado a $w=1.40$ mm, mientras que las línea en la zona de la división (ws1, ws2 y ws3) establecen con su anchura la cantidad de potencia que se canaliza por cada salida.

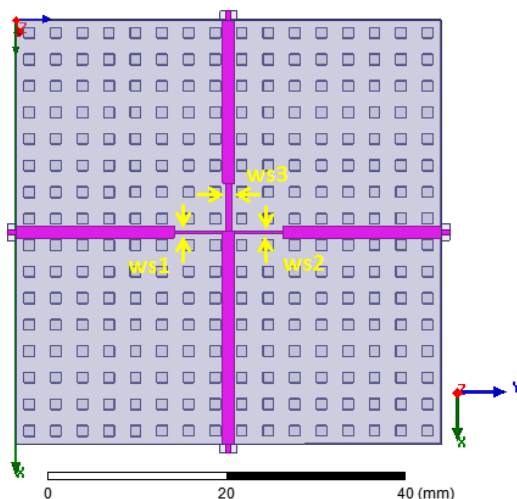


Figura 19: Divisor de tres salidas en el test-fixture.

4. Fabricación de prototipos

En el proceso de fabricación se puede dividir en tres partes.

- En primer lugar se encuentra el conjunto de piezas metálicas que forman el sistema de medida. Su fabricación se ha realizado mediante el fresado de una placa de aluminio en el centro de mecanizado de alta velocidad DATRON (modelo M25) del Laboratorio del Grupo de Radiación Electromagnética (ITEAM) que se muestra en la figura 20.



Figura 20: Centro de mecanizado de alta velocidad DATRON - M25.

Estas piezas son las que forman la estructura del test-fixture para los circuitos en tecnología suspended-strip gap-waveguide, es decir, la superficie de base de pines que sintetiza la PMC y la superficie PEC superior. Además proporciona la infraestructura necesaria para montar y fijar las piezas. La figura 21 muestra la parte inferior del sistema test-fixture donde se observan la base de pines y los canales de las transiciones hasta los puertos de las guías de onda rectangulares.

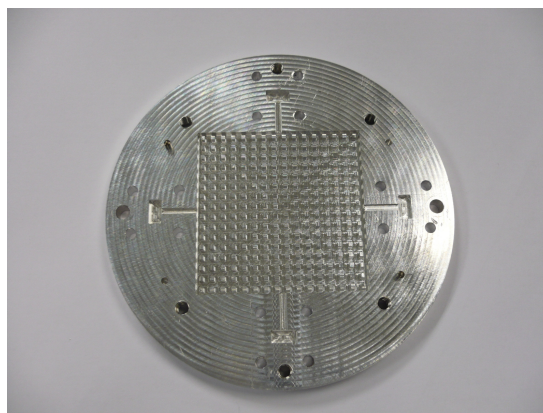


Figura 21: Test-Fixture. Parte inferior.

- En segundo lugar, el coaxial rectangular de la transición se ha fabricado, de nuevo en las instalaciones del Laboratorio del Grupo de Radiación Electromagnética (ITEAM), mediante el sustrato Nelco NY9220, de permitividad relativa $\epsilon_r = 2,20$, adecuado para aplicaciones de alta frecuencia y con una tangente de pérdidas de $tg\delta = 0,0009$ medida a 10 GHz.
- Por último, los circuitos suspended-strip se han fabricado sobre una lámina dieléctrica flexible de $50 \mu m$ de espesor, en concreto el sustrato elegido, de permitividad $\epsilon_r = 3,60$, es DuPont Pyralux AP con metalización de cobre sobre una cara de $35 \mu m$. El mecanizado de estos circuitos ha sido externalizado para asegurar la máxima precisión y fiabilidad en la fabricación. La figura 22 muestra la parte inferior del montaje de una línea suspended-strip en el test-fixture.

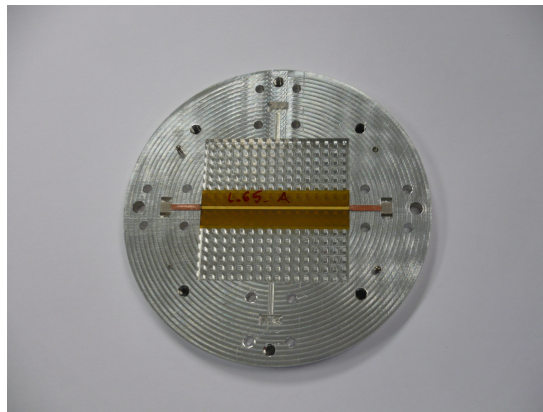


Figura 22: *Test-Fixture. Parte inferior con el circuito Suspended-Strip montado.*

En la figura 23 se observa el sistema test-fixture completo, donde se puede apreciar el montaje de las guías WR28 que proporcionan el acceso al analizador de redes del laboratorio para realizar las medidas de los parámetros de dispersión de los circuitos.

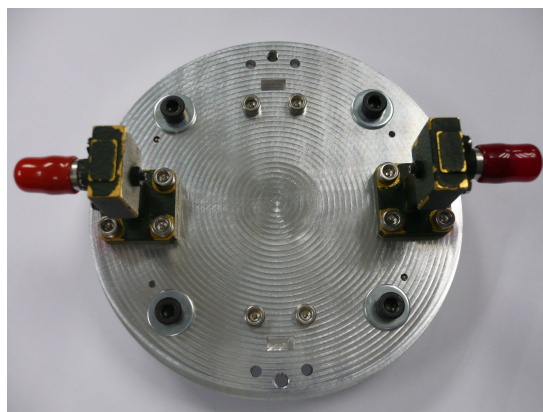


Figura 23: *Test-Fixture. Sistema completo.*

5. Medidas y resultados

5.1. Kit de calibración TRL

Con el objetivo de poder medir circuitos en la tecnología Suspended-Strip Gap-Waveguide, sin incluir los efectos provocados por las transiciones, se ha desarrollado un kit de calibración TRL. La calibración TRL requiere de la definición de los elementos THRU, REFLECT y LINE.

- El THRU presenta la conexión de dos tramos de transición de longitud $l=7.747$ mm, que se corresponde con la longitud de los canales de la transición que van desde la base de pines hasta las guía de onda rectangulares.
- La parte REFLECT ha sido mecanizada por medio de un via-hole formando un cortocircuito justo en el centro de un tramo de longitud $2l$.
- La sección LINE, con la misma impedancia y constante de propagación que la sección THRU, presenta una longitud de $2l + \lambda/4$ a la frecuencia de 36.85 GHz.

La figura 24 muestra la fabricación de este kit de calibración TRL, donde se observan los tres elementos descritos.

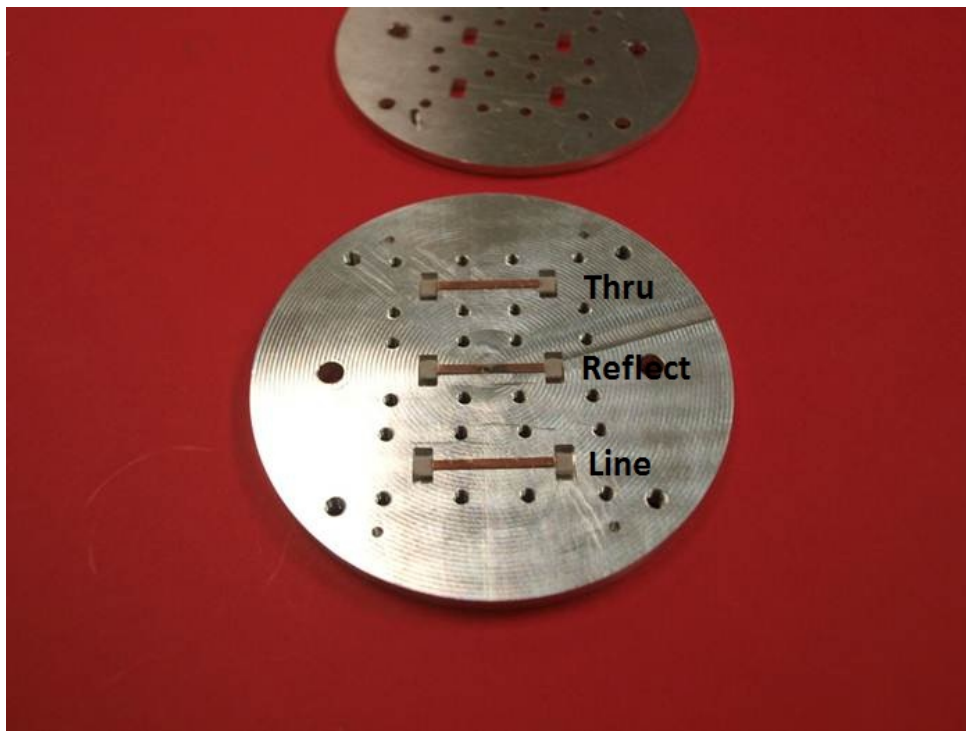


Figura 24: *Kit de calibración TRL para Suspended-Strip Gap-Waveguide.*

5.2. Estudio de repetibilidad

Para poder evaluar la fiabilidad del sistema de montaje diseñado es importante cuantificar la repetibilidad del proceso, esto indicará si las medidas son perfectamente consistentes y repetibles. Para llevar a cabo el estudio de repetibilidad se han recogido los datos de un conjunto de medidas de la misma línea Suspended-Strip Gap-Waveguide. Esta línea ha sido montada y desmontada en cada una de las medidas realizadas. Para establecer el grado de repetibilidad se ha calculado la Desviación Relativa Estandar (Relative Standard Deviation - RSD) para cada parámetro de dispersión como la media para cada punto en frecuencia de $100 \cdot (\text{Desviación Estandar de } S_{ii} / \text{Promedio de } S_{ii})$. Una vez hecho esto, se calcula la media de todos los valores para cada parámetro de dispersión.

La tabla 1 muestra los resultados de las medidas.

Tabla 1: *Desviación Estandar Relativa para las medidas de cada parámetro de dispersión.*

	LINE			
	S_{11}	S_{12}	S_{21}	S_{22}
RSD (%)	13.02	3.31	3.30	19.76

Lo resultados obtenidos concluyen una buena fiabilidad en cuanto a la repetibilidad de las medidas obtenidas con el sistema de montaje de circuitos presentado. La figura 25 muestra los parámetros de dispersión del conjunto de medidas realizadas.

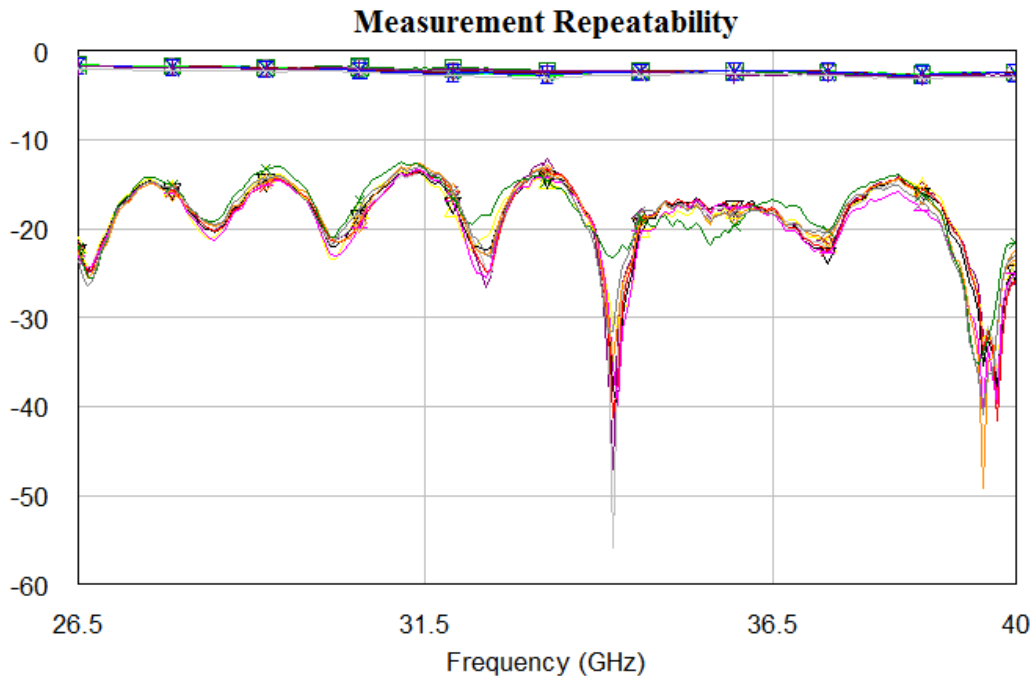


Figura 25: *Parámetros de dispersión obtenidos en varias medidas de una línea Suspended-Strip Gap-Waveguide.*

5.3. Resultados

Se han fabricado algunas líneas y divisores de potencia para verificar la viabilidad del sistema test-fixture diseñado y la capacidad de uso de la tecnología suspended-strip gap-waveguide en la banda Ka. Posteriormente se han comparado los resultados obtenidos en estas medidas con los resultados de las simulaciones. Todas las medidas se han llevado a cabo en la banda que comprende desde los 36 hasta los 38 GHz.

5.3.1. Líneas de transmisión

Las líneas fabricadas corresponden a prototipos de líneas de transmisión rectas donde se ha modificado en ancho de tira de cobre de la Suspended-Strip Gap-Waveguide. A continuación se representan las tablas con los resultados de los parámetros de dispersión y su representación gráfica.

Tabla 2: Línea $w=0.24$ mm. Parámetros S simulados vs. medidos a 36.85 GHz.

LINEA 1	S_{11} (dB)	S_{21} (dB)
Simulated	-11.45	-3.71
Measured	-10.04	-4.19

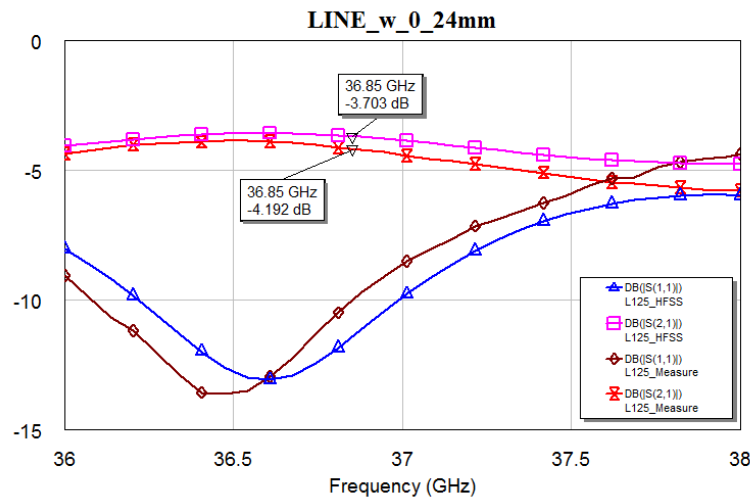


Figura 26: Comparativa parámetros S medidos vs. simulados - línea $w=0.24$ mm

Tabla 3: Línea $w=0.43$ mm. Parámetros S simulados vs. medidos a 36.85 GHz.

LINEA 2	S_{11} (dB)	S_{21} (dB)
Simulated	-9.48	-3.03
Measured	-8.65	-3.13

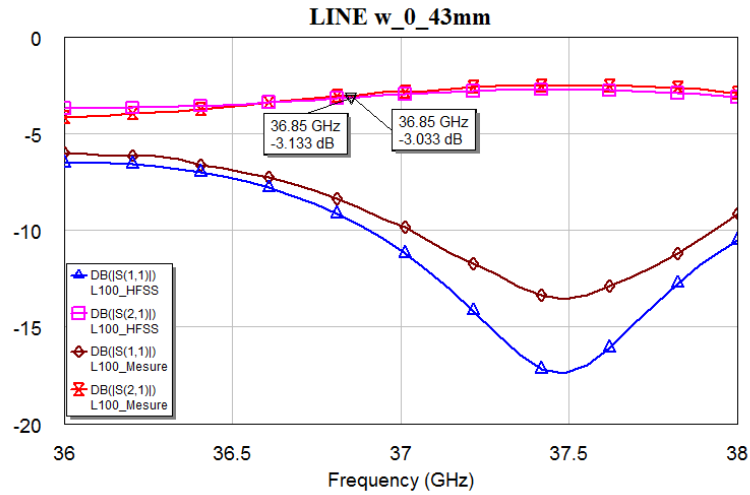


Figura 27: Comparativa parámetros S medidos vs. simulados - línea $w=0.43$ mm

Tabla 4: Línea $w=0.83$ mm. Parámetros de dispersión simulados vs. medidos a 36.85 GHz.

LINEA 3	S_{11} (dB)	S_{21} (dB)
Simulated	-13.05	-2.16
Measured	-10.96	-2.20

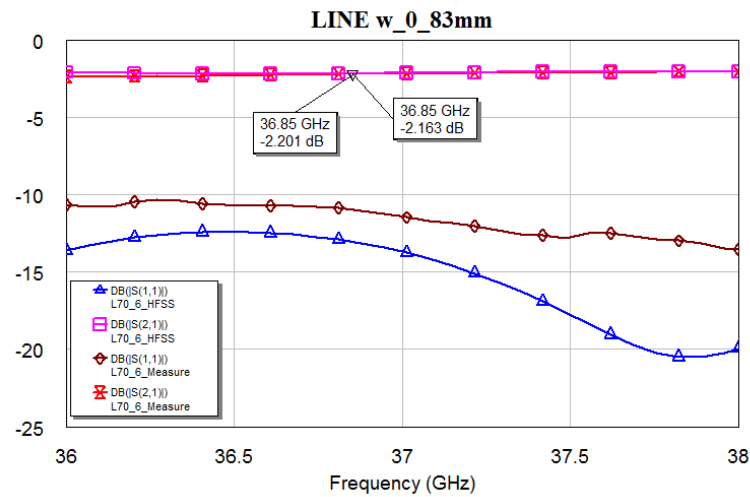


Figura 28: Comparativa parámetros S medidos vs. simulados - línea $w=0.83$ mm

Tabla 5: Línea $w=0.95$ mm. Parámetros S simulados vs. medidos a 36.85 GHz.

LINEA 4	S_{11} (dB)	S_{21} (dB)
Simulated	-14.45	-2.00
Measured	-10.51	-2.20

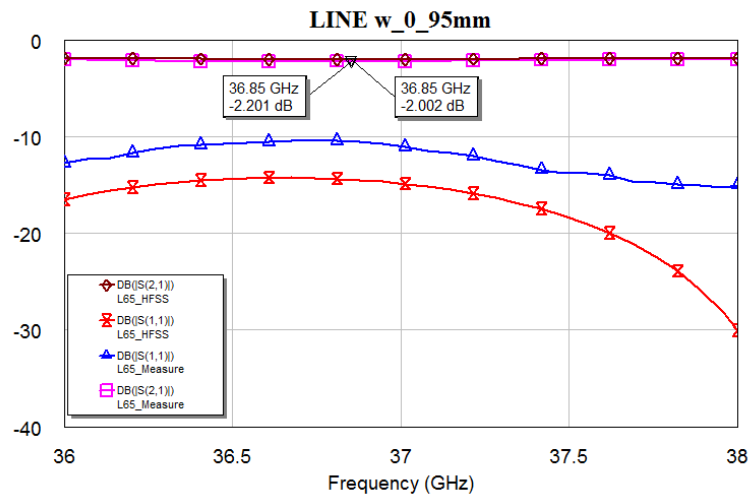


Figura 29: Comparativa parámetros S medidos vs. simulados - línea $w=0.95$ mm

Tabla 6: Línea $w=1.40$ mm. Parámetros S simulados vs. medidos a 36.85 GHz.

LÍNEA 5	S_{11} (dB)	S_{21} (dB)
Simulated	-27.04	-1.75
Measured	-20.49	-2.24

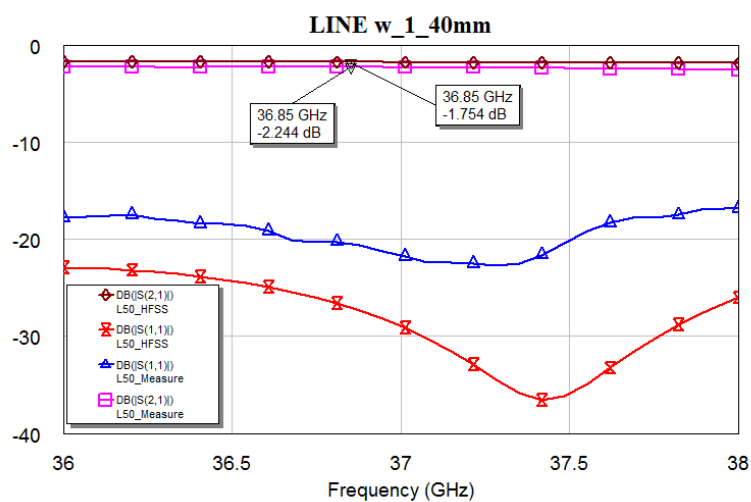


Figura 30: Comparativa parámetros S medidos vs. simulados - línea $w=1.40$ mm

5.3.2. Divisores de potencia de 2 salidas

En esta sección se presentan los divisores de potencia de dos salidas que se han fabricado. En la configuración en forma de T diseñada, los diferentes circuitos varían el ancho de las líneas centrales, dejando los accesos a los puertos fijos.

Divisor de potencia con anchos de línea $ws1=0.67$ mm y $ws2=0.67$ mm.

Tabla 7: Divisor de potencia 2.1. Parámetros S simulados vs. medidos a 36.85 GHz.

DIV 12 1	S_{11} (dB)	S_{21} (dB)	S_{31} (dB)
Simulated	-25.82	-4.80	-4.80
Measured	-22.95	-4.23	-5.17

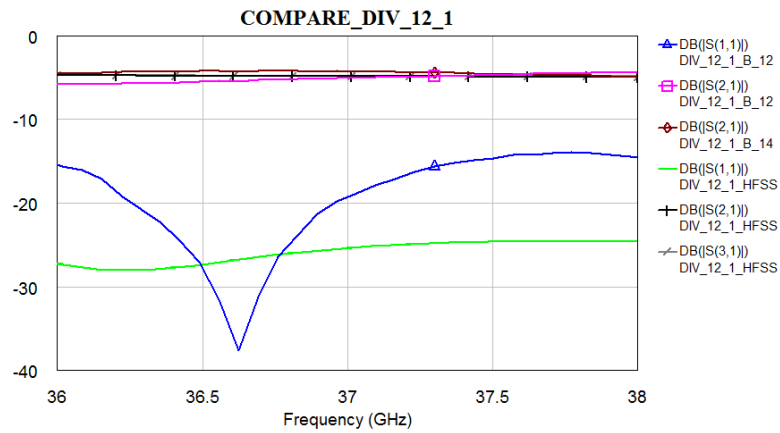


Figura 31: Comparativa parámetros S medidos vs. simulados - divisor 2.1

Divisor de potencia con anchos de línea $ws1=0.30$ mm y $ws2=0.70$ mm.

Tabla 8: Divisor de potencia 2.2. Parámetros S simulados vs. medidos a 36.85 GHz.

DIV 12 2	S_{11} (dB)	S_{21} (dB)	S_{31} (dB)
Simulated	-16.68	-6.58	-3.82
Measured	-11.47	-6.50	-4.03

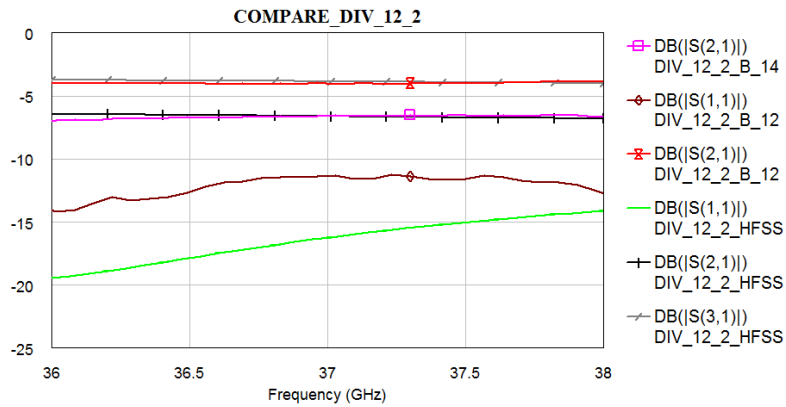


Figura 32: Comparativa parámetros S medidos vs. simulados - divisor 2.2

Divisor de potencia con anchos de línea $w_{s1}=0.40$ mm y $w_{s2}=0.60$ mm.

Tabla 9: Divisor de potencia 2.3. Parámetros S simulados vs. medidos a 36.85 GHz.

DIV 12 3	S_{11} (dB)	S_{21} (dB)	S_{31} (dB)
Simulated	-17.03	-4.36	-5.71
Measured	-19.34	-6.19	-7.54

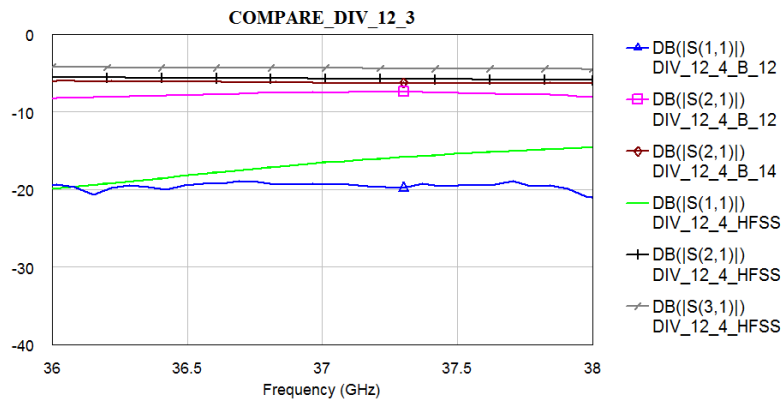


Figura 33: Comparativa parámetros S medidos vs. simulados - divisor 2.3

Divisor de potencia con anchos de línea $w_{s1}=0.77$ mm y $w_{s2}=0.57$ mm.

Tabla 10: Divisor de potencia 2.4. Parámetros S simulados vs. medidos a 36.85 GHz.

DIV 12 4	S_{11} (dB)	S_{21} (dB)	S_{31} (dB)
Simulated	-22.90	-4.34	-5.37
Measured	-27.75	-5.35	-7.38

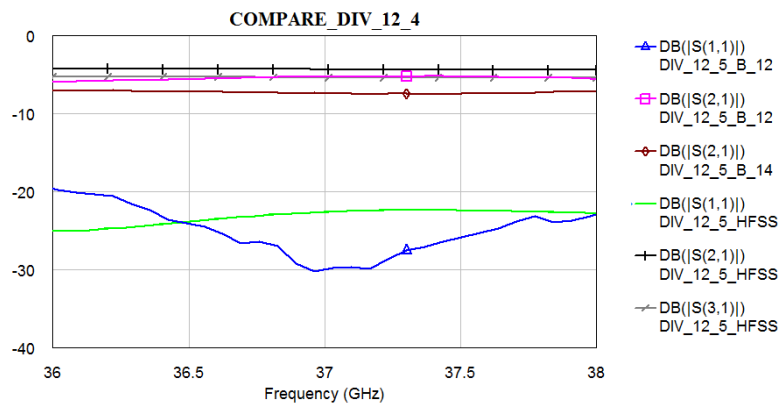


Figura 34: Comparativa parámetros S medidos vs. simulados - divisor 2.4

5.3.3. Divisores de potencia de 3 salidas

En esta sección se presentan los divisores de potencia de tres salidas. En la configuración diseñada, de forma similar a los divisores de potencia de dos salidas, los diferentes circuitos varían el ancho de las líneas centrales dejando los accesos a los puertos fijos.

Divisor de potencia con anchos de línea $ws1=0.58$ mm, $ws2=0.36$ mm y $ws3=0.71$ mm.

Tabla 11: Divisor de potencia 3.1. Parámetros S simulados vs. medidos a 36.85 GHz.

DIV 13 1	S_{11} (dB)	S_{21} (dB)	S_{31} (dB)	S_{41} (dB)
Simulated	-17.44	-5.03	-7.06	-8.71
Measured	-21.35	-7.01	-7.06	-8.87

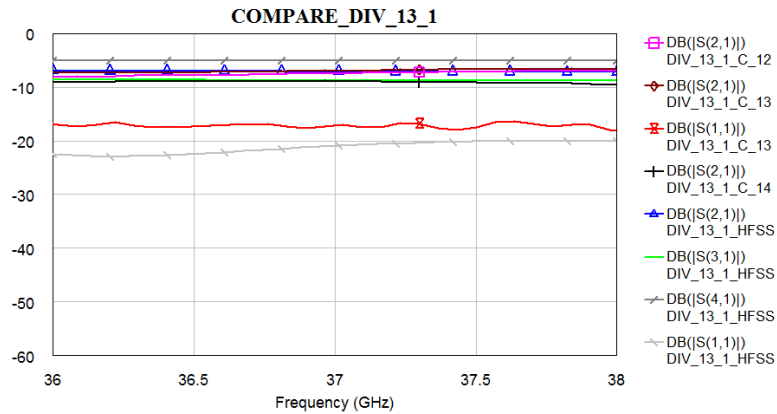


Figura 35: Comparativa parámetros S medidos vs. simulados - divisor 3.1

Divisor de potencia con anchos de línea $ws1=0.67$ mm, $ws2=0.67$ mm y $ws3=0.67$ mm.

Tabla 12: Divisor de potencia 3.2. Parámetros S simulados vs. medidos a 36.85 GHz.

DIV 13 2	S_{11} (dB)	S_{21} (dB)	S_{31} (dB)	S_{41} (dB)
Simulated	-63.00	-6.03	-6.93	-6.89
Measured	-26.67	-6.49	-7.39	-7.08

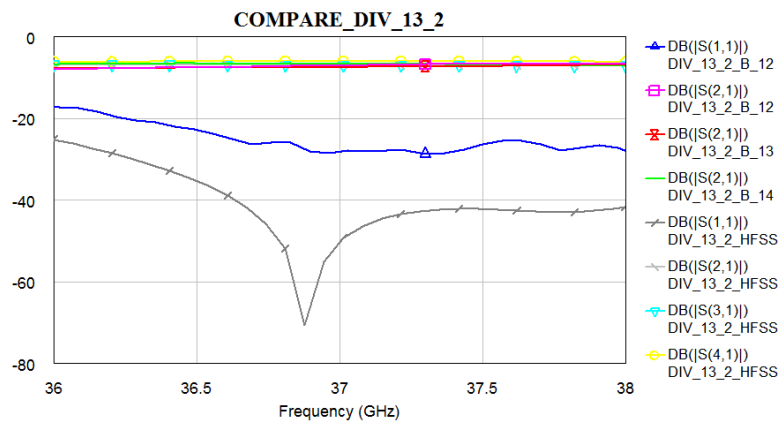


Figura 36: Comparativa parámetros S medidos vs. simulados - divisor 3.2

Divisor de potencia con anchos de línea $ws1=0.67$ mm, $ws2=0.67$ mm y $ws3=0.83$ mm.

Tabla 13: Divisor de potencia 3.3. Parámetros S simulados vs. medidos a 36.85 GHz.

DIV 13 3	S_{11} (dB)	S_{21} (dB)	S_{31} (dB)	S_{41} (dB)
Simulated	-27.00	-5.48	-7.32	-7.26
Measured	-26.02	-7.39	-7.80	-8.53

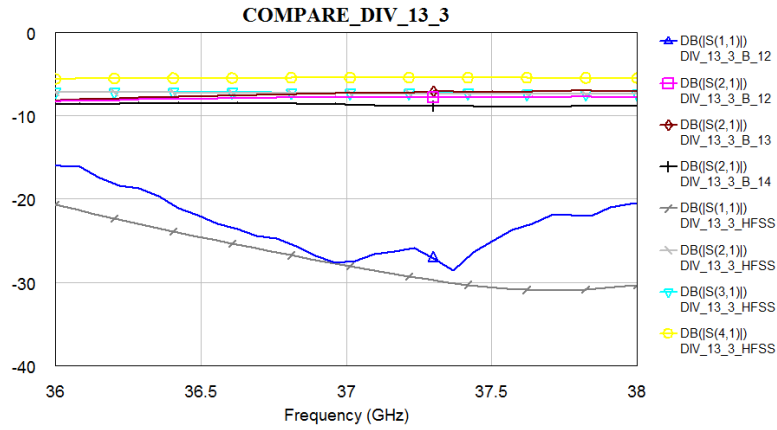


Figura 37: Comparativa parámetros S medidos vs. simulados - divisor 3.3

Divisor de potencia con anchos de línea $w_{s1}=0.24$ mm, $w_{s2}=0.24$ mm y $w_{s3}=0.67$ mm.

Tabla 14: Divisor de potencia 3.4. Parámetros S simulados vs. medidos a 36.85 GHz.

DIV 13 4	S_{11} (dB)	S_{21} (dB)	S_{31} (dB)	S_{41} (dB)
Simulated	-13.64	-9.33	-9.33	-4.30
Measured	-14.03	-9.44	-9.30	-4.56

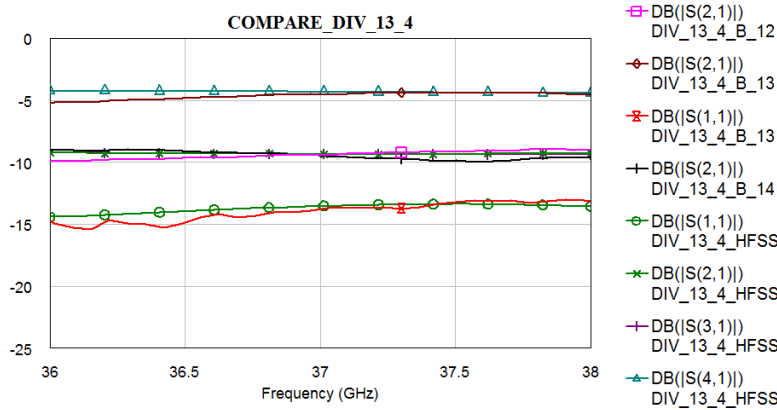


Figura 38: Comparativa parámetros S medidos vs. simulados - divisor 3.4

Divisor de potencia con anchos de línea $w_{s1}=0.67$ mm, $w_{s2}=0.24$ mm y $w_{s3}=0.67$ mm.

Tabla 15: Divisor de potencia 3.5. Parámetros S simulados vs. medidos a 36.85 GHz.

DIV 13 5	S_{11} (dB)	S_{21} (dB)	S_{31} (dB)	S_{41} (dB)
Simulated	-20.79	-5.12	-6.31	-9.58
Measured	-19.53	-6.46	-7.83	-9.73

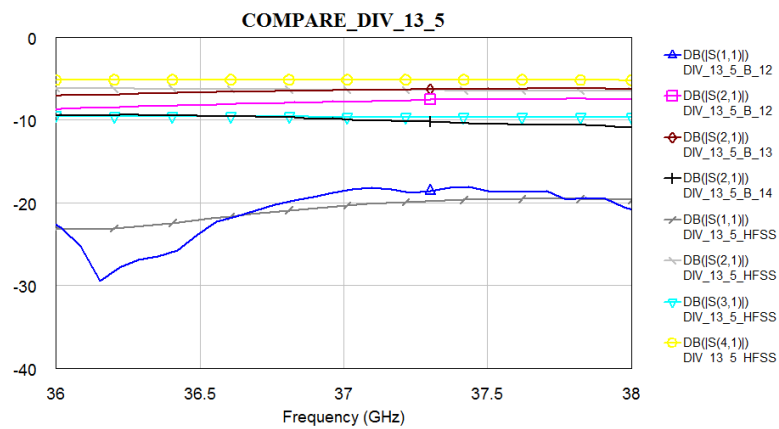


Figura 39: Comparativa parámetros S medidos vs. simulados - divisor 3.5

6. Conclusiones

La tecnología Gap-Waveguide está siendo desarrollada en los últimos años con la intención de reemplazar a las técnicas convencionales de empaquetamiento para circuitos de microondas, en especial a partir de los 30 GHz. La estructura Suspended-Strip Gap-Waveguide puede ser una buena solución para el diseño y fabricación de prototipos de una forma rápida y poco costosa. El objetivo de este trabajo se ha centrado en la tarea imprescindible de desarrollar un sistema de medición rápida que permita probar los diseños realizados de manera ágil y a un coste económico viable para acelerar el proceso de investigación.

En primer lugar, se ha demostrado la viabilidad de utilizar la tecnología Suspended-Strip Gap-Waveguide en las frecuencias de la banda Ka, en concreto, se ha diseñado una estructura periódica de band-gap entre 23 y 48 GHz.

Uno de los aspectos principales ha sido el diseño de la transición WR28 - Suspended-Strip Gap-Waveguide, que ha permitido poder conectar nuestros prototipos a los aparatos de medida mediante líneas de transmisión estándar.

Por otra parte, el sistema Test-Fixture diseñado ha demostrado ser flexible y práctico, permitiendo hacer una gran cantidad de medidas de prototipos de manera rápida. Adicionalmente, el diseño de un kit de calibración TRL y el estudio estadístico de la repetibilidad del proceso, ofrecen mayor fiabilidad y robustez al sistema de medidas.

7. Líneas futuras

De manera global, la tecnología Gap-Waveguide seguirá necesitando grandes esfuerzos en el desarrollo de aspectos básicos. Impedancia característica, factor de calidad y su integración con otros componentes activos y pasivos son campos que están abiertos a ser investigados en profundidad. La influencia de las estructuras de band-gap (EBG) en este tipo de realizaciones presenta dificultades a la hora de realizar algunos estudios que son de gran importancia para el desarrollo de métodos de análisis y síntesis. Además, serán necesarios más avances en el campo de las transiciones con otras tecnologías de alta frecuencia.

Como resultado del trabajo presentado se pueden destacar algunas cuestiones que requieren de un mayor estudio en profundidad. La realización Suspended-Strip de la tecnología Gap-Waveguide introduce el uso de dieléctricos en la estructura. Aunque las láminas flexibles de dieléctrico utilizadas son de espesores mínimos, su efecto en el comportamiento electromagnético de los circuitos y las pérdidas introducidas deben ser consideradas. Otro aspecto a subrayar es el efecto de la posición de las líneas Suspended-Strip en relación a la estructura periódica. En los diseños presentados se ha procurado mantener la posición de las líneas de manera que éstas no se encontraran justo por encima de los pines de la base. En estos diseños, la posición afecta a la impedancia característica y por tanto modifica el comportamiento electromagnético. En este sentido, soluciones como una estructura periódica con más densidad de pines se están empezando a estudiar como continuación de este Trabajo Fin de Master.

El objetivo de esta nueva tecnología para un futuro próximo debe ser el desarrollo de sistemas que permitan trabajar en bandas milimétricas y de THz. Aplicaciones en sistemas de antenas, comunicaciones inalámbricas, conexiones de ultra-alta velocidad, detección de explosivos, o imagen para el diagnóstico médico son algunos de los ejemplos donde podrían aplicarse las ventajas de estas estructuras.

Referencias

- [1] P. S. Kildal, “Three metamaterial-based gap waveguides between parallel metal plates for mm/submm waves,” in *Proceedings of the 3rd European Conference in Antennas and Propagation*, pp. 28–32, Mar. 2009.
- [2] 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, pp. 84–87, 2009.
- [3] P. S. Kildal, “Waveguides and transmission lines in gaps between parallel conducting surfaces,” in *European patent application EP08159791.6*, Jul. 2008.
- [4] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. Broas, N. Alexopolous, and E. Yablonovitch, “High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 11, pp. 2059–2074, 1999.
- [5] M. G. Silveirinha, C. Fernandes, and J. Costa, “Electromagnetic characterization of textured surfaces formed by metallic pins,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 2, pp. 405–415, 2008.
- [6] A. Polemi, S. Maci, and P. S. Kildal, “Dispersion characteristics of a metamaterial-based parallel-plate ridge gap waveguide realized by a bed of nails,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 3, pp. 904–913, 2011.
- [7] A. Polemi, S. Maci, and P. S. Kildal, “Approximated closed form characteristic impedance for the bed of nails-based gap waveguide,” in *Proceedings of the 4th European Conference in Antennas and Propagation*, Apr. 2010.
- [8] E. Alfonso, P. S. Kildal, A. Valero-Nogueira, and M. Baquero, “Study of the characteristic impedance of a ridge gap waveguide,” in *Antennas and Propagation Society International Symposium*, Jul. 2009.
- [9] P. S. Kildal, A. U. Zaman, E. Rajo-Iglesias, E. Alfonso, and A. Valero-Nogueira, “Design and experimental verification of ridge gap waveguides in bed of nails for parallel plate mode suppression,” *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 5, no. 3, pp. 262–270, 2011.
- [10] E. Alfonso, M. Baquero, A. Valero-Nogueira, J. I. Herranz, and P. S. Kildal, “Power divider in ridge gap waveguide technology,” in *Proceedings of the 4th European Conference in Antennas and Propagation*, Apr. 2010.

- [11] E. Alfonso, M. Baquero, P. S. Kildal, A. Valero-Nogueira, E. Rajo-Iglesias, and J. I. Herranz, “Design of microwave circuits in ridge-gap waveguide technology,” in *IEEE MTT 2010 International Microwave Symposium*, May 2010.
- [12] P. S. Kildal, E. Rajo-Iglesias, E. Pucci, A. U. Zaman, and A. Kishk, “Losses in ridge gap waveguide compared with rectangular waveguides and microstrip transmission lines,” in *Proceedings of the 4th European Conference in Antennas and Propagation*, Apr. 2010.
- [13] E. Rajo-Iglesias, A. U. Zaman, and P. S. Kildal, “Parallel plate cavity mode suppression in microstrip circuit packages using a lid of nails,” *IEEE Microwave Wireless Components Letters*, vol. 20, no. 1, pp. 31–33, 2010.
- [14] E. Pucci, A. U. Zaman, E. Rajo-Iglesias, and P. S. Kildal, “New low loss inverted microstrip line using gap waveguide technology for slot antenna applications,” in *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation*, Apr. 2011.
- [15] A. Valero-Nogueira, M. Baquero, J. I. Herranz, J. Domenech, E. Alfonso, and A. Vila, “Gap waveguides using a suspended strip on a bed of nails,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 1006–1009, 2011.
- [16] D. M. Pozar, *Microwave Engineering. Second Edition*, p.156. Armonk, NY.: John Wiley and Sons, Inc., 1998.

A. Artículos

A.1. XXVI Simposium Nacional - URSI 2011

A.2. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters

TECNOLOGÍA RIDGE GAP WAVEGUIDE. DISEÑO ALTERNATIVO PARA FABRICACIÓN DE PROTOTIPOS EN BANDA KA

Carlos Gahete Arias⁽¹⁾, Mariano Baquero Escudero⁽¹⁾, Alejandro Valero Nogueira⁽¹⁾,
Antonio Vila Jiménez⁽¹⁾, Bernardo Bernardo Clemente⁽¹⁾

cargaar@teleco.upv.es, mbaquero@dcom.upv.es, avalero@dcom.upv.es, anviji@iteam.upv.es, berbercl@iteam.upv.es

⁽¹⁾Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (ITEAM).

Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera S/N, Valencia, 46022

Resumen—Recently, new Ridge Gap Waveguide technology has been presented. This paper presents a new design for Ka-band prototypes manufacture in Ridge Gap Waveguide. First, benefits of this new technology to manufacture high frequency microwave circuits are described. The design of a Ka-band antenna feed network in this new technology is presented. The study of new technologies operating in these frequency bands to reduce circuits dimensions and manufacturing costs can provide a strong interest in sectors like defense, remote sensing and space communications.

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de nuevas tecnologías que trabajen en las frecuencias altas de la banda de microondas y que permitan un abaratamiento de los costes de fabricación, constituye una línea de investigación primordial y en los últimos años está desembocando en la aparición de nuevas estructuras específicas para estas bandas de frecuencia. Una de estas tecnologías en fase de desarrollo es la conocida como Ridge Gap Waveguide (RGW) [1] - [4]. Los estudios llevados a cabo y las publicaciones efectuadas hasta ahora en este tipo de tecnología, se han centrado principalmente en la banda de frecuencias Ku [5] - [6], entre los 12 y los 18 GHz.

El trabajo aquí presentado se centra en el estudio, análisis y posterior diseño de una red de alimentación conformadora de haz para una antena radar en banda Ka (26.5 - 40 GHz), proponiendo un diseño alternativo para la fabricación de prototipos en este tipo de guías Ridge Gap Waveguide.

II. TECNOLOGÍA RGW EN BANDA KA

La tecnología Ridge Gap Waveguide, basada en estructuras metamateriales de band gap (EBG) [7] - [8], se presenta como una alternativa a los clásicos circuitos de microondas e incorpora ventajas que hacen que su uso sea interesante. En la figura 1 se puede ver la estructura de la guía. La geometría la componen una tira (ridge) de ancho w y altura t junto con dos capas de pines de ancho w_n , altura t y separación sep junto con un plano superior situado a una distancia h ($< \lambda/4$). Al quedar confinado el campo propagado entre la tira y el plano superior y siendo el medio aire esta estructura presenta valores de pérdidas muy bajos, cercanos a los proporcionados por estructuras de guía onda convencional [9], y permite la fabricación, ensamblaje e integración con otros elementos de manera sencilla. La fabricación de una red con guías de onda rectangulares mecanizadas en plano H obliga a garantizar un

perfecto contacto entre las piezas metálicas. La realización con Ridge Gap Waveguide no necesita de estos contactos, facilitando su fabricación. Estas características, por tanto, hacen a este tipo de tecnología muy interesante, especialmente en las bandas de milimétricas y submilimétricas.

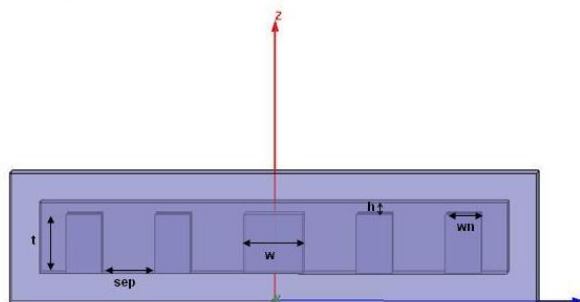
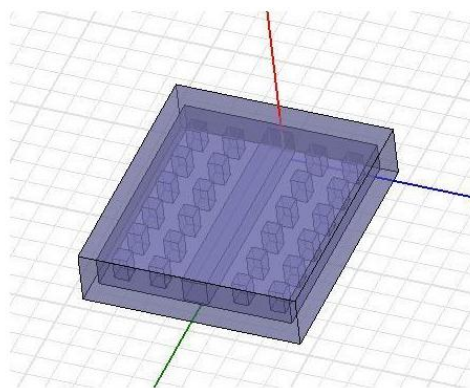


Fig. 1. Geometría de una Ridge Gap Waveguide.

En la red de alimentación para radar desarrollada, la frecuencia central de operación se establece en 36.85 GHz. Las dimensiones de las estructuras periódicas, como la matriz de pines utilizada para la guía Ridge Gap Waveguide, establecen el bandgap de frecuencias de operación en el que será posible la utilización de la estructura como línea de transmisión. En la Tabla I se muestran las dimensiones del diseño.

Parámetros	w	wn	sep	t	h
Dimensiones (mm)	2	1.2	1.8	2	0.4

Tabla I. Dimensiones para una guía Ridge Gap Waveguide en banda Ka.

III. DISEÑO ALTERNATIVO. FABRICACIÓN DE PROTOTIPOS

Para tratar de acometer de una manera eficiente y poco costosa el proceso de fabricación de múltiples prototipos, se ha diseñado una nueva morfología de la tecnología Ridge Gap Waveguide conservando los principios básicos y la filosofía del diseño original. Esta nueva versión incluye la incorporación de materiales dieléctricos flexibles con metalización por una cara que permiten la descripción de circuitos de forma similar a las placas de circuito impreso (PCB). Se trata de rediseñar la estructura de forma que mantenga el esquema básico de la Ridge Gap Waveguide y que permita independizar lo máximo posible la matriz de pines y el ridge que guía el campo electromagnético. Por lo tanto, la gran ventaja de esta técnica propuesta para la realización de prototipos, es que permite la utilización de la misma estructura metálica para la realización múltiples circuitos que trabajen en la misma banda de frecuencias con tan solo sustituir el circuito impreso sobre el material dieléctrico.

La configuración propuesta que se muestra en la figura 2 se basa en una matriz de pines periódica y uniforme sobre la que se coloca un sustrato dieléctrico de permitividad $\epsilon_r=3.3$ y $50 \mu m$ de grosor con una capa de metalizado de cobre de $35 \mu m$ de grosor. A una distancia t (gap), se sitúa la tapa metálica superior.

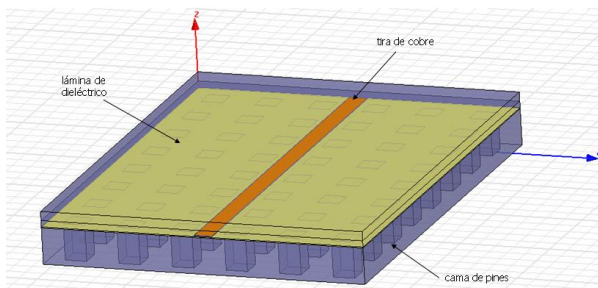


Fig. 2. Diseño alternativo de una Ridge Gap Waveguide.

Como se puede observar, la estructura sigue manteniendo la idea básica de la Ridge Gap Waveguide original, donde se distinguen claramente dos regiones:

- PEC sobre PEC: Esta región se forma en el hueco existente entre el cobre y la tapa PEC superior. Es el equivalente a la región que forma la ridge en la RGW original.
- PEC sobre PMC: Es la región formada entre la tapa PEC superior y la superficie PMC que forma la estructura de matriz de pines en aquellos lugares donde no existe cobre. Es la región que impide la propagación indeseada.

A. Transición Guía de onda - Prototipo alternativo RGW

Para poder realizar las medidas de los prototipos fabricados se diseñó una transición de la guía de onda rectangular WR-28 ($a=7.112 \text{ mm}$, $b=3.556$) a la Ridge Gap Waveguide. La figura 3 muestra el aspecto de estas transiciones. La longitud

y el ancho de la tira que penetra en la guía rectangular y la distancia de la misma al cortocircuito de la guía han sido optimizados para conseguir niveles de adaptación por debajo de -25 dB en la banda de trabajo.

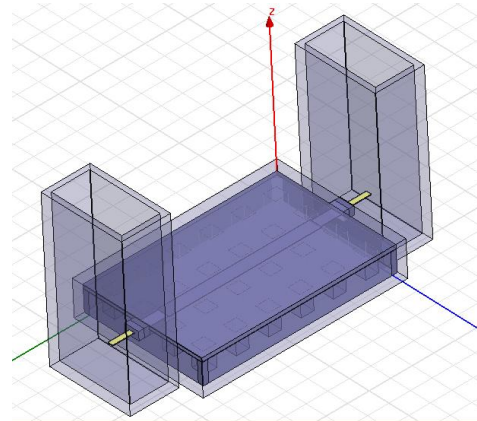


Fig. 3. Transición WG - RGW alternativo.

B. Efecto de la posición de las líneas de cobre

Uno de los elementos a tener en cuenta en este nuevo diseño de RGW presentado es la posición relativa de las tiras de cobre que forman las líneas de transmisión y los pines de la matriz. A continuación se muestra una parametrización del efecto de la posición de la línea de cobre en la transición mostrada en apartado anterior, desplazándola tal y como se muestra en la figura 4.

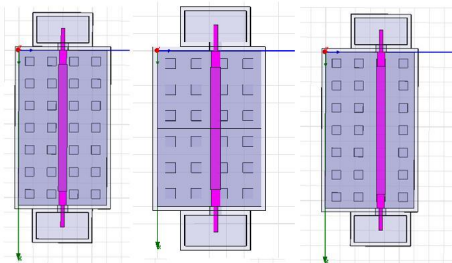


Fig. 4. Desplazamiento de la línea de cobre sobre la matriz de pines.

Como se observa en la gráfica de la figura 5, los mejores resultados para el parámetro (S_{11}) se obtienen para una posición en la que la línea ridge queda centrada entre pines y empeora a medida que la línea ridge se sitúa sobre ellos. En una variación de la posición de un 15% conseguimos un coeficiente de reflexión por debajo de -20 dB , por tanto, a la hora de realizar los diseños, habrá que procurar que los circuitos se mantengan en este rango de posiciones.

En la actualidad se está trabajando en el estudio de matrices de pines más tupidas que proporcionen a la estructura más insensibilidad en cuanto al posicionado de las líneas.

C. Diseño de divisores de potencia

La red de alimentación de la antena es una red en árbol compuesta por varios divisores. A continuación se presentan los diseños de algunos de los divisores que forman la red.

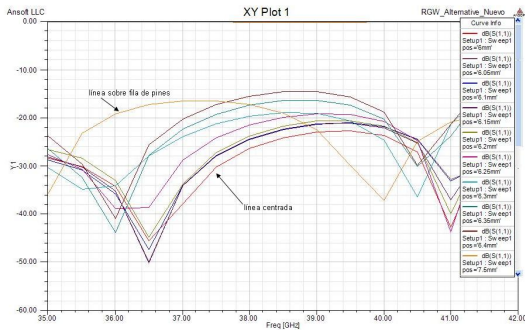


Fig. 5. Coeficientes de transmisión y reflexión

1) *Divisores 1 a 2*: El primer diseño realizado para esta nueva tecnología consiste en un divisor de una entrada y dos salidas no balanceadas (ver figura 6). Los valores objetivo de los parámetros de dispersión en los accesos de salida fueron $S_{21}=-5.92$ dB y $S_{31}=-1.28$ dB.

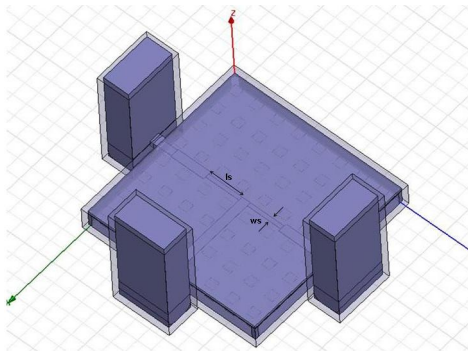


Fig. 6. Divisor de potencia balanceado.

En la gráfica 7 se aprecia el reparto de potencia en los dos accesos de salida, $S_{21}=-5.94$ dB y $S_{31}=-1.56$ dB, así como un buen nivel de adaptación a la entrada en la banda de trabajo.

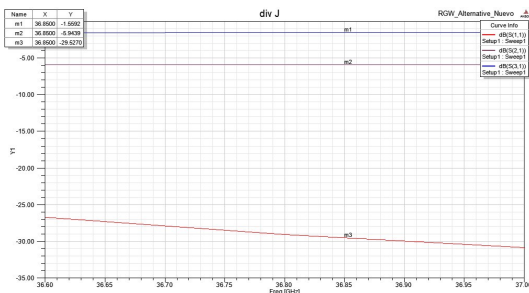


Fig. 7. Parámetros S. Divisor de potencia no balanceado.

2) *Divisores 1 a 3*: El siguiente diseño es un divisor de una entrada a tres salidas no equilibrado. Los valores objetivos para los accesos de salida fueron $S_{21}=-5.19$ dB, $S_{31}=-6.6$ dB y $S_{41}=-3.2$ dB. En la figura 8 se muestra una representación del módulo del campo eléctrico en el divisor.

La figura 9 muestra el reparto de potencia en los tres accesos, donde los valores obtenidos son $S_{21}=-5.31$ dB, $S_{31}=-6.96$ dB y $S_{41}=-3.47$ dB y en nivel de adaptación a la entrada en la banda de operación esta por debajo de -20 dB.

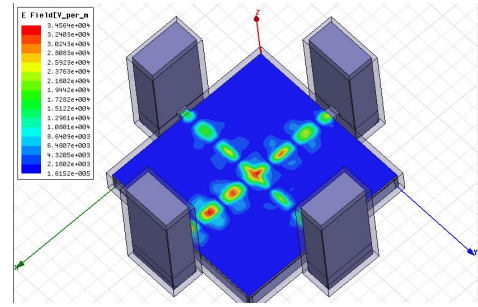


Fig. 8. Divisor de potencia 1 a 3.

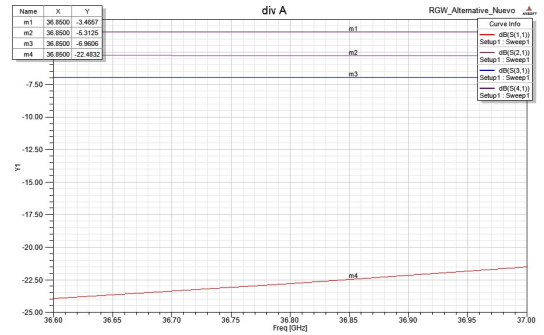


Fig. 9. Parámetros S. Divisor de potencia 1 a 3.

IV. FABRICACIÓN Y MEDIDAS

Una de las grandes ventajas del diseño alternativo propuesto para la fabricación de prototipos en guías Ridge Gap Waveguide es, sin duda, la capacidad de reutilización de toda la estructura formada por la matriz de pines y la tapa metálica superior. Por tanto, a pesar de que el primer paso para la validación de los diseños propuestos es obtener los resultados de los parámetros de dispersión para una transición, para el prototipo fabricado se ha optado por crear una matriz de pines de 16 filas x 16 columnas (48 mm x 48 mm) y así poder abarcar en el futuro, con la misma estructura, el diseño de algunos sencillos circuitos de microondas. La gráfica de la figura 10 muestra los resultados de los parámetros de dispersión simulados para el caso de una línea de transmisión con transición a guía de onda rectangular.

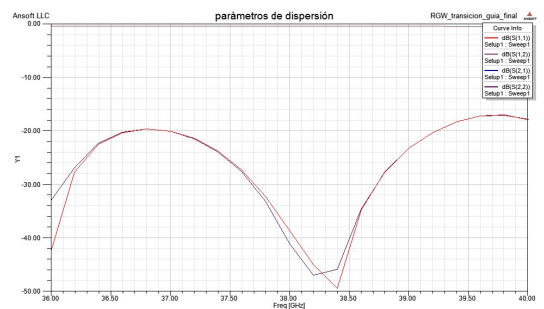


Fig. 10. Diseño del prototipo de la transición.

La figura 11 muestra la fabricación de las piezas necesarias que permiten la realización de la transición y el acoplo con las bridas de las guías WR-28.

Los resultados obtenidos para los parámetros de dispersión se presentan en gráfica 12.

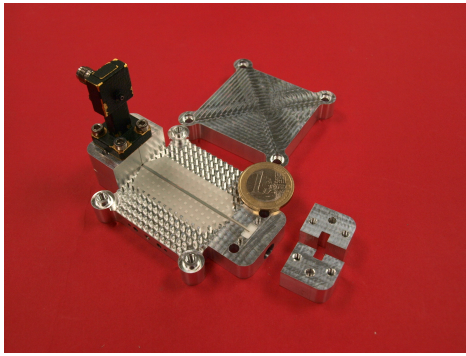


Fig. 11. Prototipo. Detalle de las piezas de la transición.

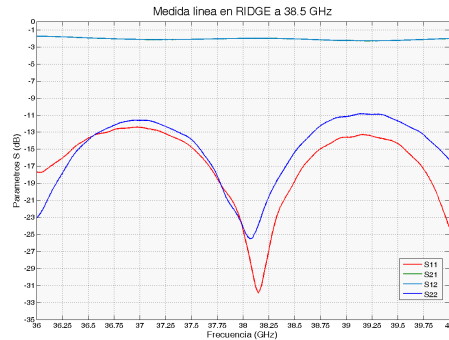


Fig. 12. Prototipo. Parámetros de dispersión medidos.

Como se puede apreciar, las pérdidas de retorno medidas en este prototipo, se comportan prácticamente de la misma manera que los parámetros simulados (ver figura 10), existiendo un pico de resonancia en torno a los 38.25 GHz. Sin embargo, se observa que en la banda donde peor se comporta la estructura, estos valores se sitúan en torno a los -13 dB, y no en los -20 dB de la simulación. En cuanto a las pérdidas de inserción, que idealmente deberían situarse en aproximadamente -0.2 dB, encontramos una respuesta en toda la banda de unos -2 dB, que se deben, entre otras cosas, a la imperfecta realización de la transición entre la guía WR-28 y la RGW. Actualmente se está fabricando un kit de calibración TRL para eliminar este problema.

V. DISEÑO DE LA RED DE ALIMENTACIÓN

Los diagramas de antena con perfil cosecante se utilizan habitualmente en aplicaciones radar. Son varios los métodos que existen para el diseño de una antena con un diagrama cosecante, siendo uno de ellos el uso de agrupaciones de antenas. La red de excitación de la agrupación será clave para obtener los pesos deseados de la agrupación. En [10] y [11] se presentó una solución de una red de alimentación para una agrupación en banda Ka en guía de onda. La red de alimentación de la antena estaba formada por un divisor 1 a 24 realizado mediante una estructura en árbol con los divisores 1 a 2 y 1 a 3. Después de diseñar todos los divisores de la red con la tecnología RGW presentada en este artículo, en la figura 13 se muestra el diagrama de radiación comparando la respuesta obtenida con el diseño de la red de alimentación en tecnología Ridge Gap Waveguide y los casos ideal y real con guía de ondas rectangular. Se puede observar que la red

diseñada presenta un diagrama muy parecido al ideal.

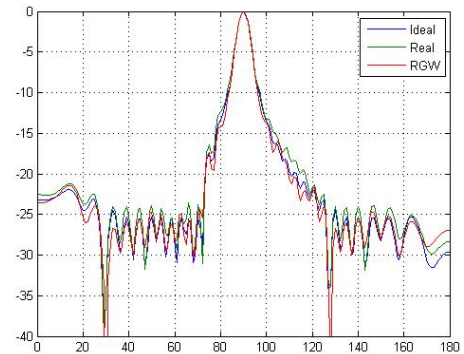


Fig. 13. Diagrama cosecante.

VI. CONCLUSIONES

Se ha abordado con éxito el desarrollo de una nueva morfología para el diseño y fabricación de prototipos en la tecnología Ridge Gap Waveguide. A partir de los resultados obtenidos se demuestra la viabilidad de utilizar este tipo de tecnología para la realización de sistemas que operen en bandas de frecuencia elevada, como la banda Ka.

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*, 8:84-87, abril 2009.
- [2] P. S. Kildal, "Waveguides and transmission lines in gaps between parallel conducting surfaces" *European patent application EP08159791.6*, 7 de julio, 2008.
- [3] A. Polemi, S. Maci and P. S. Kildal, "Approximated Closed Form Characteristic Impedance for the Bed of Nails-based Gap Waveguide" *Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2010 Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation, abril 2010.
- [4] E. Alfonso, P. S. Kildal, A. Valero-Nogueira and M. Baquero, "Study of the Characteristic Impedance of a Ridge Gap Waveguide" *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2009. APSURSI '09, julio 2009.
- [5] E. Alfonso, M. Baquero, A. Valero-Nogueira, J. I. Herranz and P. S. Kildal, "Power divider in Ridge Gap Waveguide Technology" *Technical report*, 4th European Conference in Antennas and Propagation, abril 2010.
- [6] E. Alfonso, M. Baquero, P. S. Kildal, A. Valero-Nogueira, E. Rajo-Iglesias and J. I. Herranz, "Design of Microwave Circuits in Ridge-Gap Waveguide Technology" *Technical report*, IEEE MTT 2010 International Microwave Symposium, mayo 2010.
- [7] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. Broas, N. Alexopolous and E. Yablonovitch, "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band" *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47(11):2059-2074, noviembre 1999.
- [8] M. G. Silveirinha, C. Fernandes and J. Costa, "Electromagnetic characterization of textured surfaces formed by metallic pins" *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 56(2):405-415, febrero 2008.
- [9] P. S. Kildal, E. Rajo-Iglesias, E. Pucci, A. U. Zaman and A. Kishk, "Losses in ridge gap waveguide compared with rectangular waveguides and microstrip transmission lines" *Technical report*, 4th European Conference in Antennas and Propagation, abril 2010.
- [10] M. Baquero, M. C. Fayos and D. Sánchez, "Red de alimentación para la síntesis de Chebychev de una agrupación de antenas en banda Ka" *Symposium Nacional URSI* 2007.
- [11] M. Baquero, A. Valero-Nogueira, J. I. Herranz and D. Sánchez, "Red de alimentación para una antena con perfil cosecante en banda Ka" *Symposium Nacional URSI* 2009.

Test-Fixture for Suspended-Strip Gap-Waveguide Technology on Ka-band

Carlos Gahete Arias⁽¹⁾, Mariano Baquero Escudero⁽¹⁾, Alejandro Valero Nogueira⁽¹⁾, Antonio Vila Jiménez⁽¹⁾
cargaar@teleco.upv.es, mbaquero@dcom.upv.es, avalero@dcom.upv.es, anviji@iteam.upv.es

⁽¹⁾Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (ITEAM).
Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera S/N, Valencia, 46022

Abstract—The gap-waveguide technology is a new concept of transmission line that has emerged in the last few years. The basic idea of these kind of waveguides is to propagate a quasi-TEM mode along desired paths in the air gap between two metal surfaces and prohibits all other modes by making use of artificial magnetic conductors (AMC). This paper presents a test-fixture for a suspended-strip gap-waveguide which provides a fast measurement system for prototyping stage. For this purpose it has been developed a transition from standard waveguide to this new technology. A TRL kit and a repeatability study have been made to ensure the reliability of the process and several straightforward circuits have been manufactured and measured.

I. INTRODUCTION

A new transmission line for the millimeter and sub-millimeter waves, called gap-waveguide, has been proposed recently [1] - [3]. Analytical study for ridge gap-waveguide realized by bed of nails and its characteristic impedance are presented in [4] - [6]. Moreover, the experimental verification and several designs of microwave circuits have been shown in [7] - [9]. Gap-waveguides are based in energy transmission along the paths formed in the gap between parallel metal plates, a quasi-TEM mode is propagated without need of dielectric. The use of an artificial magnetic conductor (AMC), such as bed of nails, stops the field in any other directions. Figure 1 shows a practical realization of a ridge gap-waveguide. Note that the contact between the parallel metal parts is not required. Furthermore, because the absence of dielectric, a low loss have been demonstrated for the ridge gap-waveguide [10], being an interesting alternative solution at high frequencies in place of standard waveguides and planar circuits.

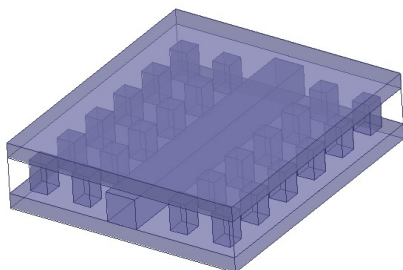


Fig. 1. Practical realization of a ridge gap-waveguide.

However, the geometry described above for the ridge gap-waveguides represents a drawback from the point of view of manufacturing. The use of metal ridge for the confinement and

guiding of the electromagnetic fields involves the rearrangement of the bed of nails for each circuit. This can result in an excessive consumption of time and excessive costs, especially in the prototype stage.

An alternative practical realization based on a suspended-strip on a bed of nails has been presented in [11] - [12]. As shown in Figure 2, this configuration replaces the metal ridge by a copper strip printed on a thin dielectric laminate. In this case, the configuration of the bed of nails conforms a completely regular periodic pattern that implies the possibility of its reuse by placing different printed circuits operating in the frequency band supported. Evidently, this results in advantages in terms of time and manufacturing cost.

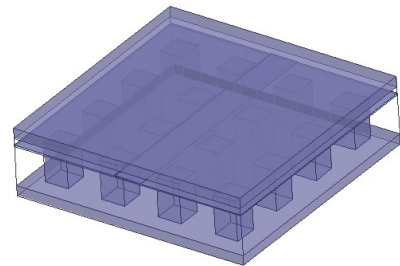


Fig. 2. Practical realization of a suspended-strip gap-waveguide.

Nevertheless, in both cases there is a need to design transitions for connecting these new guides to the measurement devices through standard transmission lines. This paper presents a test-fixture introducing the design of a transition from standard waveguide to suspended-strip gap-waveguide. This provides a simple circuit assembly system for measurements of prototypes without welding. Moreover, in the referenced articles, analyzes and experimental verifications have been developed for frequencies between 12 and 18 GHz, however, the use of this new technology can present major advantages for use in higher frequency bands such as Ka-band.

II. TEST-FIXTURE SYSTEM

The idea of making transitions without any welding, for building test-fixtures, is easily found in the microwave circuit industry for microstrip or coplanar technology [13]. Similarly, the transition designed for the text-fixture presented uses the standard waveguide WR28 (7.112 x 3.556 mm) to connect the suspended-strip gap-waveguide to the vector network analyzer, covering the frequency range from 26 to 40 GHz.

A. Transition design

The main concept of the designed transition is to create a connection channel from the suspended-strip gap-waveguide through a rectangular coaxial to penetrate in the standard waveguide. First, a small tab of the copper from the suspended-strip gap-waveguide is inserted into the rectangular coaxial being trapped by its two halves by pressure as shown in Figure 3. At the other end of the connection channel, the inner conductor of rectangular coaxial penetrates the waveguide a length of 1.67 mm and is located at $l=1.7$ mm from the short of the waveguide. Also a part of the dielectric from rectangular coaxial ($\epsilon_r = 2.2$) enters the waveguide giving a more robust structure. All dimensions have been optimized to achieve a good impedance matching in a narrow bandwidth around the center frequency of 36.85 GHz.

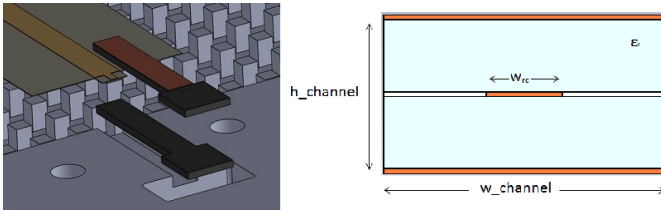


Fig. 3. Detail of transition view.

As reference, the dimensions for rectangular coaxial configuration ($w_{channel} = 2$ mm - $h_{channel} = 1.121$ mm - $w_{rc} = 0.77$ mm) have been chosen. So, characteristic impedance of the rectangular coaxial is 50 Ω .

B. Suspended-Strip Gap-Waveguide for Ka-band

The suspended-strip gap-waveguide study for Ka-band has been performed with the geometry shown in Figure 4. The ridge has been replaced by a copper strip of 35 μ m of thickness and width of 1.4 mm (w) printed on a thin dielectric substrate of 50 μ m with $\epsilon_r = 3.6$.

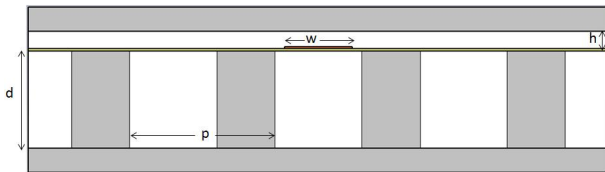


Fig. 4. Suspended-strip gap-waveguide geometry considered.

In Figure 5 the dispersion diagram for the geometry described above is shown. The nails are 1.2 mm square base side and height of 2 mm (d) with a periodicity of 3 mm (p) and the air gap between the upper plate and the nails has been established in 0.4 mm. Simulations are carried out with CST Eigenmode Solver. The quasi-TEM mode is propagating between 23 and 48 GHz and the other modes are cutoff in the band of interest.

III. MANUFACTURING AND MEASURE

A. TRL calibration kit

In order to measure the S-parameters of the suspended-strip gap-waveguide circuit itself, not including the transitions, a TRL calibration kit has been designed. THRU, REFLECT

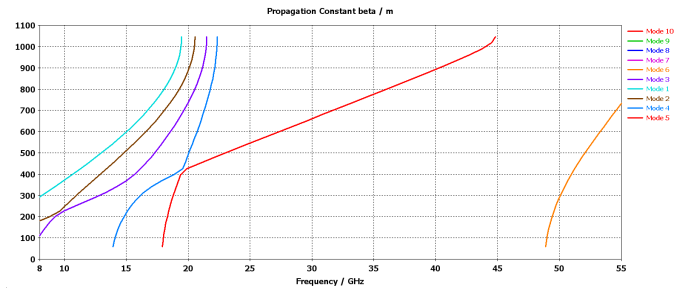


Fig. 5. Dispersion diagram of a suspended-strip gap-waveguide for geometry shown in Figure 4

and LINE must be defined. The THRU has been realized by connecting two transition sections of length $l = 7.747$ mm, the REFLECT part has been mechanized by means of metalized via hole that forms short circuit, and the LINE has the same impedance and propagation constant that THRU section and a length of $2l + \lambda/4$ at $f_c = 36.85$ GHz. Figure 6 shows the practical realization of this TRL kit.

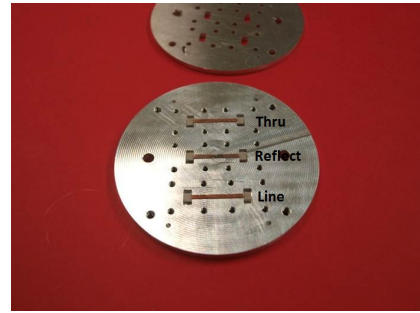


Fig. 6. TRL calibration kit for suspended-strip gap-waveguide.

B. Measurement repeatability

To assess the reliability of the assembly system designed to take measurements, it is important to know the repeatability of the process, this will indicate whether the measure is perfectly consistent and repeatable. To carry out the study, the results of a set of ten measures of the same suspended-strip waveguide line were collected. To establish the degree of repeatability the *Relative Standard Deviation* was calculated for each S parameter as the average of $100 \times [(\text{Standard Deviation of } S_{ii}) / (\text{Average of } S_{ii})]$ for each frequency point. Then, it is calculated the average of all these values obtained in each S parameter. Table I shows the results of these measures.

TABLE I
RELATIVE STANDARD DEVIATION FOR A LINE S PARAMETERS.

	LINE			
	S_{11}	S_{12}	S_{21}	S_{22}
RSD (%)	13.02	3.31	3.30	19.76

The results obtained conclude the high reliability of repetition of the assembly system. Figure 7 shows the scattering parameters of the set of measurements.

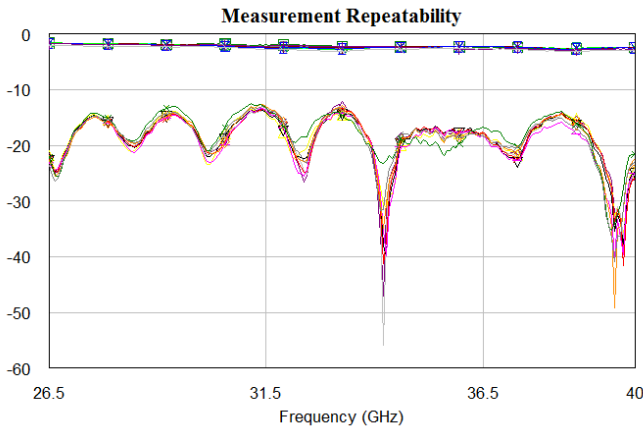


Fig. 7. Scattering parameters for several measures of a suspended-strip waveguide line.

C. Prototyping

Some circuits have been made to check both feasibility of a suspended-strip in Ka-band and the test-fixture system designed. First, several straight lines have been simulated by commercial software HFSS and then manufactured and measured. Later, two and three-way power dividers have been tested in the same way.

1) *Straight Line*: Figure 8 shows the assembly of the prototype, in the left side it can be seen complete transition from the WR28 waveguides to the suspended-strip gap-waveguide with analyzer connectors. At the right side, assembly of a line suspended in the bed of nails is shown, note that the upper metal plane is removed.

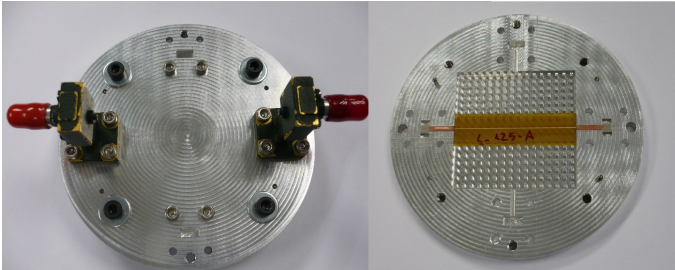


Fig. 8. Straight LINE Prototype.

Different lines have been tested with several widths as shown Table II. It is shown the comparison between simulated and measure S_{21} results of each line. The length of the lines is 48 mm, which corresponds to 16 nails in the axial direction.

TABLE II
 S_{21} SIMULATED VS. MEASURED IN SEVERAL LINES AT 36.85 GHz.

w (mm)	Simulated	Measured
1.4	-1.75	-2.24
0.95	-2.00	-2.20
0.83	-2.16	-2.20
0.43	-3.03	-3.13
0.24	-3.71	-4.19

In Figure 9, simulated and measured S-parameters of $w=0.43$ mm line are shown. Conductor and dielectric losses

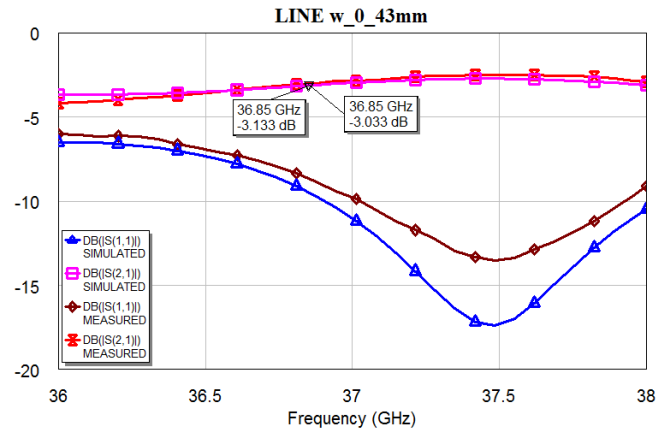


Fig. 9. Simulated and measured S-parameters of $w = 0.43$ mm line.

have been taken into account in the simulation. A fairly good agreement between simulation and measurement is observed.

2) *Two-Way Power Divider*: In Figure 10 it is shown the geometry of two-way power divider used. It is a unbalanced splitter generated from two matching lines of different width ($w_1=0.3$ mm and $w_2=0.7$ mm) and 4.8 mm of length. For the access, the line width $w = 1.4$ mm is chosen to achieve maximum adaptation in the transition.

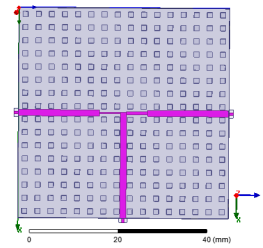


Fig. 10. Two-Way Power Divider

Table III shows the results of S-parameter simulations and measures of the two-way power divider of Figure 10.

TABLE III
TWO-WAY POWER DIVIDER. SIMULATED VS. MEASURED S-PARAMETERS AT 36.85 GHz.

DIV 12 2	S_{11} (dB)	S_{21} (dB)	S_{31} (dB)
Simulated	-16.68	-6.58	-3.82
Measured	-11.47	-6.50	-4.03

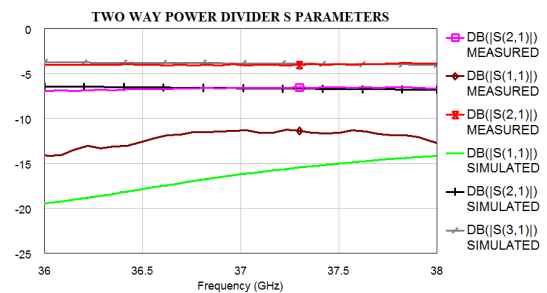


Fig. 11. Simulated and measured S-parameters of two-way power divider.

3) *Three-Way Power Divider*: Similarly as in the previous section, Figure 12 shows the geometry of three-way power divider used. In this case, the divider is generated from three matching lines, both of them have the same width $w_{s1}=w_{s2}=0.24$ mm, and the third is $w_{s3}=0.67$ mm of width. All of them are 5.4 mm of length. For the access, the line width $w = 1.4$ mm is chosen to achieve maximum adaptation in the transition.

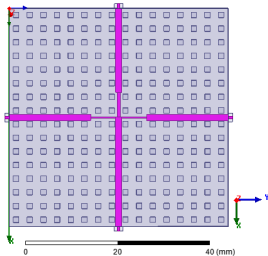


Fig. 12. Three-Way Power Divider

Table IV shows the results of S-parameter simulations and measures of the three-way power divider of Figure 12.

TABLE IV
THREE-WAY POWER DIVIDER. SIMULATED VS. MEASURED
S-PARAMETERS AT 36.85 GHz.

DIV 13 2	S_{11} (dB)	S_{21} (dB)	S_{31} (dB)	S_{41} (dB)
Simulated	-13.64	-9.33	-9.33	-4.30
Measured	-14.03	-9.44	-9.30	-4.56

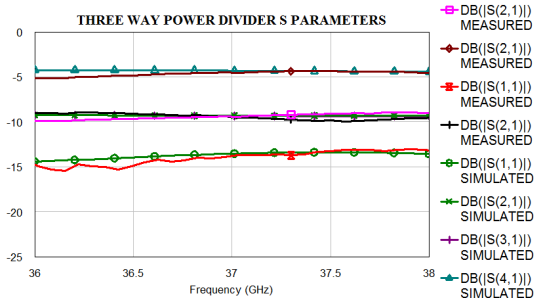


Fig. 13. Simulated and measured S-parameters of three-way power divider.

Figure 14 shows the three-way power divider prototype manufactured and measured.

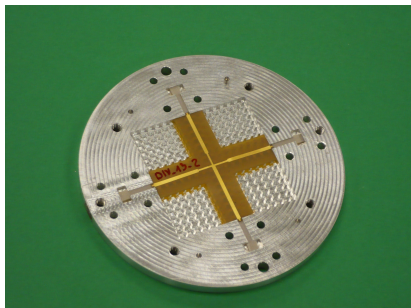


Fig. 14. Three-Way Power Divider Prototype

IV. CONCLUSIONS

Gap-waveguide technology is being investigated and developed the last few years to replace conventional packaging

techniques. Suspended-strip gap-waveguide could be a good way to design and manufacture prototypes quickly and low-cost. In this paper a text-fixture system for these kind of prototypes on Ka-band has been presented. A TRL calibration kit has been designed to ensure the reliability of the S-parameters measures of the suspended-strip gap-waveguide. Moreover, it has been demonstrated that the assembly and disassembly of circuits with the standard waveguide-to-rectangular coaxial transition designed is perfectly consistent and repeatable. Finally, a fairly good agreement between simulation and measurement has been observed.

REFERENCES

- [1] P. S. Kildal, "Three metamaterial-based gap waveguides between parallel metal plates for mm/submm waves" 3rd European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2009, pp. 28-32.
- [2] 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, pp. 84-87, 2009.
- [3] P. S. Kildal, "Waveguides and transmission lines in gaps between parallel conducting surfaces" European patent application EP08159791.6, Jul. 7, 2008.
- [4] A. Polemi, S. Maci and P. S. Kildal, "Dispersion characteristics of a metamaterial-based parallel-plate ridge gap waveguide realized by a bed of nails" IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 59, no. 3, pp. 904-913, Mar. 2011.
- [5] A. Polemi, S. Maci and P. S. Kildal, "Approximated Closed Form Characteristic Impedance for the Bed of Nails-based Gap Waveguide" Antennas and Propagation (EuCAP), 2010 Proceedings of the 4th European Conference on Antennas and Propagation, Apr. 2010.
- [6] E. Alfonso, P. S. Kildal, A. Valero-Nogueira and M. Baquero, "Study of the Characteristic Impedance of a Ridge Gap Waveguide" Antennas and Propagation Society International Symposium, 2009. APSURSI '09, Jul. 2009.
- [7] P. S. Kildal, A. U. Zaman, E. Rajo-Iglesias, E. Alfonso and A. Valero-Nogueira, "Design and experimental verification of ridge gap waveguides in bed of nails for parallel plate mode suppression" IET Microwaves, Antennas and Propagation, vol. 5, no. 3, pp. 262-270, Mar. 2011.
- [8] E. Alfonso, M. Baquero, A. Valero-Nogueira, J. I. Herranz and P. S. Kildal, "Power divider in Ridge Gap Waveguide Technology" Technical report, 4th European Conference in Antennas and Propagation, Apr. 2010.
- [9] E. Alfonso, M. Baquero, P. S. Kildal, A. Valero-Nogueira, E. Rajo-Iglesias and J. I. Herranz, "Design of Microwave Circuits in Ridge-Gap Waveguide Technology" Technical report, IEEE MTT 2010 International Microwave Symposium, May 2010.
- [10] P. S. Kildal, E. Rajo-Iglesias, E. Pucci, A. U. Zaman and A. Kishk, "Losses in ridge gap waveguide compared with rectangular waveguides and microstrip transmission lines" Technical report, 4th European Conference in Antennas and Propagation, Apr. 2010.
- [11] A. Valero-Nogueira, M. Baquero, J. I. Herranz, J. Domenech, E. Alfonso and A. Vila, "Gap waveguides using a suspended strip on a bed of nails" IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 10, pp. 1006-1009, 2011.
- [12] E. Pucci, A. U. Zaman, E. Rajo-Iglesias and P. S. Kildal, "New low loss inverted microstrip line using gap waveguide technology for slot antenna applications" Antennas and Propagation (EuCAP), 2011 Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation, Apr. 2011.
- [13] KEYCOM Characteristic Technologies. Measurement and analysis systems for constants and characteristics of electric materials. Test fixture.