

TRANSICIÓN EN GUÍA WR-28 DE ACCESO AL CRIOSTATO PARA LA MEDIDA DE SISTEMAS ENFRIADOS

Juan Luís Cano, Enrique Villa, David Ortiz, Eduardo Artal

juanluis.cano@unican.es, villae@unican.es, david.ortizgarcia@unican.es, artale@unican.es.
Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria. Plaza de la Ciencia s/n, 39005.

Abstract- This document presents the design and characterization of a waveguide transition mounted in a cryostat window for cryogenic RF measurements in the Ka band. This waveguide transition comprises a vacuum window that enables to separate two environments with very different pressures, and a thermal break that isolates the test area inside the cryostat from the heat coming into it through the waveguide. Waveguide chokes are designed both in vacuum window and thermal break to improve RF response due to existing gaps between waveguide flanges. The transition, designed for the WR28 waveguide, covers the full band 26 – 40 GHz showing excellent return and insertion losses as well as a good thermal isolation and low air leakage.

I. INTRODUCCIÓN

La medida de sistemas de microondas en condiciones criogénicas ($T < 120$ K) representa un reto considerable debido a la escasez de tecnología desarrollada para tal fin, haciéndose necesario el desarrollo propio en muchas ocasiones. Uno de los primeros problemas que surgen a la hora de caracterizar un sistema de microondas en criogenia es la forma en que las señales van a acceder al interior del criostato.

Existen adaptadores herméticos comerciales en tecnología coaxial que pueden ser instalados en las ventanas de acceso al criostato permitiendo tomar medidas hasta los 40 GHz [1]. Pero hay aplicaciones o situaciones en las que es conveniente la medida directa en guía. Por ejemplo, si el sistema a caracterizar tiene acceso en guía, la utilización de una transición a coaxial a su entrada introduce mayor dificultad en la medida pues hay que caracterizar dicha transición en un ambiente criogénico, lo cual no es fácil. Por otra parte, en la medida del ruido de sistemas enfriados suele utilizarse la técnica del atenuador enfriado [2]. En esta técnica se sitúa un atenuador de alto valor de atenuación (15 ó 20 dB) delante del sistema a caracterizar, del cual se ha de conocer con precisión tanto la curva de atenuación como su temperatura. Si el acceso hasta dicho atenuador tiene unas pérdidas que no son despreciables frente a las del atenuador, como pasa en tecnología coaxial a alta frecuencia donde los cables de entrada pueden tener varios decibelios de pérdidas, entonces es necesario conocer con exactitud la temperatura del cable de acceso. Esto es un problema pues el cable es conectado a dos puntos con temperaturas muy distintas y por tanto hay que suponer gradientes de temperatura si se quiere un cálculo preciso del ruido del sistema. Este problema se solventa utilizando accesos en guía, pues estos presentan

unas pérdidas muy bajas incluso a alta frecuencia, siendo despreciables frente al atenuador y por tanto facilitando el proceso de medida.

En este artículo se presenta el diseño de un acceso en guía de onda WR28 al criostato, el cual solventa los principales problemas que surgen en la realización de esta transición: mantener la diferencia de presión entre el interior y exterior del criostato, y aislar el interior del criostato del calor que proviene del exterior a través de las guías. Todo esto se consigue manteniendo una buena adaptación de la transición y unas bajas pérdidas de inserción, lo cual la hace adecuada para medidas criogénicas de sistemas en bandas de microondas.

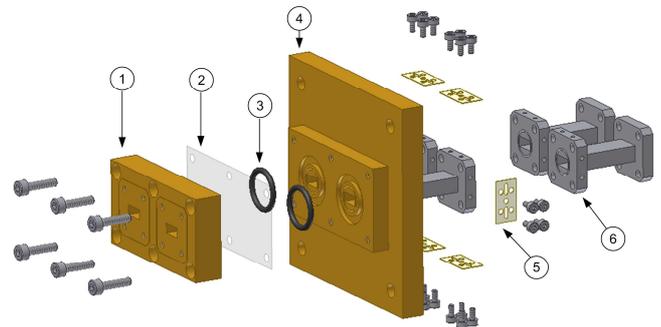


Fig. 1. Despiece de la transición doble diseñada; 1. acceso WR28; 2. lámina de Mylar; 3. juntas tóricas; 4. ventana del criostato con choke de RF; 5. soporte de PTFE para alineamiento y aislamiento; 6. guía WR28 con choke de RF.

II. DISEÑO DE LA TRANSICIÓN

El diseño de la transición, basado en [3], es doble para permitir la medida simultánea de sistemas con dos entradas. En la Fig. 1 se muestran todos los elementos que componen esta transición. Los elementos 1 a 4 forman la ventana de vacío cuya función es conservar el vacío ($P \sim 10^{-6}$ mbar) en el interior del criostato a la vez que permite el paso de las señales electromagnéticas afectándolas lo menos posible. Por otra parte, los elementos 5 y 6 forman una barrera térmica mediante la inclusión de un gap de aire en la unión entre guías. Tanto en la ventana de vacío como en la barrera térmica son necesarios sendos chokes de RF en las guías que mejoren la desadaptación producida por los gaps existentes.

A. Ventana de vacío

El elemento principal de la ventana de vacío es una fina lámina de material dieléctrico que impide que el aire entre en el criostato a través de la guía de onda. Esta lámina ha de estar hecha de un material de baja constante dieléctrica, para que las pérdidas de RF sean pequeñas, con una baja permeabilidad al vapor de agua y a gases atmosféricos, para que la presión en el interior del criostato sea lo menor posible, y además ha de tener una alta resistencia a la tensión, ya que ha de soportar las deformaciones producidas por la diferencia de presión entre los dos ambientes que separa. Es conveniente también que el material seleccionado filtre la mayor cantidad posible de radiación infrarroja para evitar el calentamiento del interior del criostato, aunque en este caso éste no es factor importante debido a la pequeña sección de la guía empleada. En la Tabla 1 aparecen los datos más significativos del Mylar® [4] (politereftalato de etileno), material elegido para la realización de esta transición por haberse demostrado anteriormente su eficacia en este tipo de aplicaciones, pese a su alto valor de permeabilidad frente a diferentes gases en comparación con otros materiales [5].

	Mylar®	Unidades
Constante dieléctrica (ϵ_r) @ 1GHz	2.8	
Factor de disipación ($\tan\delta$) @ 1GHz	0.008	
Resistencia a la tensión	> 20	kg/mm ² (kpsi)
Densidad	1.39	gr/cm ³
Coefficiente de conductividad térmica	$3.7 \cdot 10^{-4}$	cm ² ·sec·°C
Tasa de transmisión de vapor de agua @ 38°C		
- Espesor de la lámina 25 μ m	1.8	gr/100 in ² /24h
- Espesor de la lámina 50 μ m	1.1	
- Espesor de la lámina 75 μ m	0.67	
- Espesor de la lámina 100 μ m	0.42	
Permeabilidad al Oxígeno @ 25 °C	6	cc/100 in ² /24h/atm/mil
Permeabilidad al Nitrógeno @ 25 °C	1	cc/100 in ² /24h/atm/mil
Permeabilidad al Helio @ 25 °C	150	cc/100 in ² /24h/atm/mil
Transmisión óptica en el rango infrarrojo	~ 90 %	

Tabla 1. Características eléctricas, físicas, químicas y ópticas del Mylar®

La inclusión de la lámina de dieléctrico en la ventana de vacío impide el contacto directo de la guía procedente del equipo de medida con dicha ventana. Por tanto, aparece un gap relleno de Mylar® que rompe la continuidad de la guía. Este gap tiene efectos perjudiciales en el comportamiento eléctrico de la transición ya que empeora la adaptación y pérdidas de inserción de la misma en ciertas frecuencias dentro de la banda de interés.

Para solucionar esto se ha diseñado un choke de RF en la brida de la guía de la ventana de vacío. El choke consiste en una ranura circular de profundidad $\lambda_g/4$ mecanizada en la brida de la guía a una distancia $\lambda_g/4$ del borde de la guía. De esta manera se forma una cavidad entre las bridas que se unen, la cual se puede considerar una línea de transmisión de longitud $\lambda_g/2$ que produce un cortocircuito en la discontinuidad, mejorando la respuesta de ésta. Al ser la guía rectangular, la distancia del choke a ésta no es constante, y por tanto la distancia de diseño se refiere a la distancia máxima. En la Fig. 2 se muestra el esquema del choke de RF en la guía. Tras la optimización del diseño, las dimensiones del choke son: $D_{in} = 8.1$ mm, $D_{out} = 9.45$ mm y $h = 2.1$ mm.

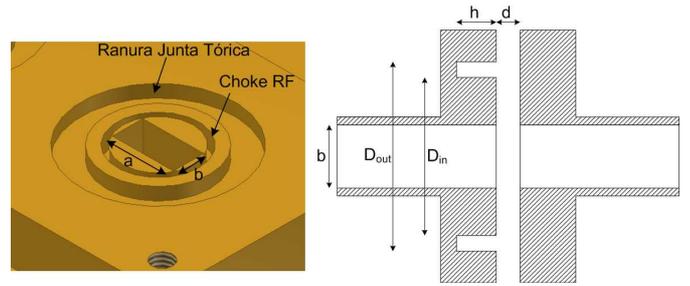


Fig. 2. Esquema del choke de RF diseñado. El parámetro d representa la separación entre guías producido por la presencia del dieléctrico.

En las Figs. 3 y 4 se muestran los resultados de simulación de la transición en la ventana de vacío para diferentes separaciones entre guías, tanto con choke como sin él. A la vista de estos resultados y de los datos de la Tabla 1 se ha elegido un espesor para la lámina de Mylar® de 75 μ m, ya que representa un compromiso entre el buen comportamiento eléctrico y su resistencia, tanto mecánica como a la transmisión de vapor de agua. Las simulaciones se han realizado con el programa HFSSv11 de Ansoft.

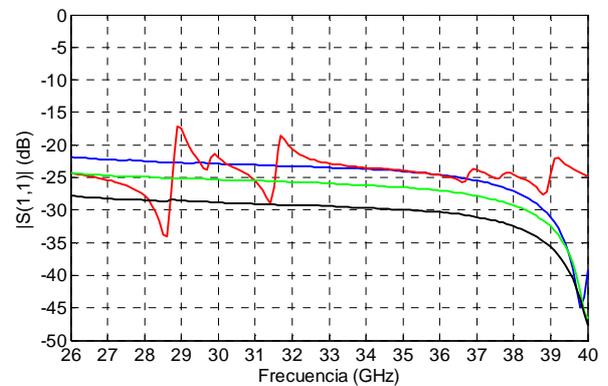


Fig. 3. Simulación del efecto del choke de RF en la reflexión de la transición para diferentes separaciones: $d = 100\mu\text{m}$, con choke (azul); $d = 75\mu\text{m}$, sin choke (rojo); $d = 75\mu\text{m}$, con choke (verde); $d = 50\mu\text{m}$, con choke (negro).

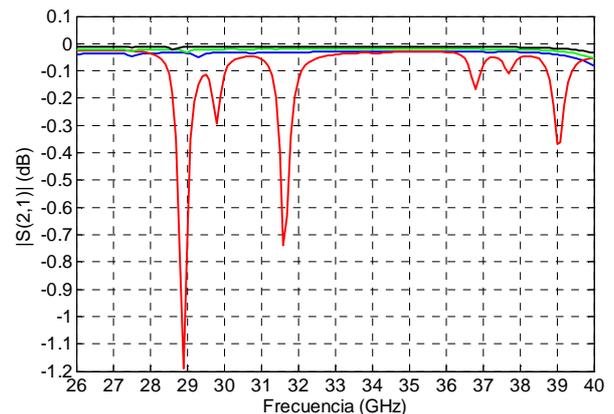


Fig. 4. Simulación del efecto del choke de RF en la transmisión de la transición para diferentes separaciones: $d = 100\mu\text{m}$, con choke (azul); $d = 75\mu\text{m}$, sin choke (rojo); $d = 75\mu\text{m}$, con choke (verde); $d = 50\mu\text{m}$, con choke (negro).

El último elemento correspondiente a la ventana de vacío es la junta tórica. En la unión entre guías, pese a la existencia del Mylar®, se producen fugas que impiden la correcta realización y mantenimiento del vacío en el interior del criostato, por lo que se hace necesario incluir una junta tórica de estanqueidad en la transición. Se ha elegido una junta de caucho-flúor, al igual que el resto de juntas existentes en el

sistema de criogenia, y su ranura ha sido mecanizada siguiendo las indicaciones del fabricante. Debido a que la junta se ubica más allá del choke de RF, ésta no tiene influencia sobre el comportamiento eléctrico de la transición.

B. Barrera térmica

Una vez que se ha atravesado la pared del criostato manteniendo el vacío en su interior surge un nuevo problema: la carga térmica por conducción sobre la etapa del criostato donde se realizan las medidas es grande, debido a la gran sección y corta longitud de la guía, lo cual dificulta o impide (dependiendo del sistema criogénico disponible) alcanzar la temperatura mínima del sistema. La carga térmica por conducción entre dos puntos a temperaturas T_1 y T_2 separados por un conductor de sección A y longitud L con conductividad térmica $K(T)$ viene dada por la Ecuación (1)[6].

$$Q = \frac{A}{L} \left[\int_0^{T_2} K(T) dT - \int_0^{T_1} K(T) dT \right] \quad (1)$$

Para el caso de $T_1 = 15 \text{ K}$, $T_2 = 300 \text{ K}$ y $L = 100 \text{ mm}$ se tiene una carga de $Q = 16.2 \text{ W}$, si la guía es de aluminio, o de $Q = 5.8 \text{ W}$, si la guía es de latón. Teniendo en cuenta que existen dos guías en la transición y que la potencia del sistema refrigerador disponible es de $4 \text{ W @ } 10 \text{ K}$ y de $17 \text{ W @ } 20 \text{ K}$ [1] se hace inviable la conexión directa de las guías de entrada al sistema bajo estudio.

La solución elegida para disminuir la carga térmica es romper el camino térmico mediante la inclusión de un gap en vacío entre la guía que se encuentra a temperatura criogénica (elemento 6 de la Fig. 1) y la que se encuentra a temperatura ambiente. De esta forma, la carga térmica por conducción es nula teóricamente, apareciendo una carga térmica por radiación, adicional a la existente de por sí en el sistema, entre las bridas de ambas guías. La carga térmica por radiación entre una superficie a temperatura T_1 y otra a temperatura T_2 puede calcularse usando la Ecuación (2) [7].

$$Q = \sigma \cdot A_1 \cdot F_A \cdot F_E (T_2^4 - T_1^4) \quad (2)$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann, $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$, A_1 es la superficie de una de las bridas, F_A es un factor que tiene en cuenta la forma y orientación de las superficies, $F_A = 1$, y F_E es el factor de emisión y absorción de las superficies, el cual viene dado por la Ecuación (3).

$$F_E = \frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2}{\epsilon_2 + \frac{A_1}{A_2} (1 - \epsilon_2) \cdot \epsilon_1} \quad (3)$$

Siendo ϵ_1 y ϵ_2 las emisividades de ambas superficies (0.03 si el material es latón y 0.08 si el material es aluminio [1]) y A_1 y A_2 las superficies de ambas bridas respectivamente (336 mm^2 en ambos casos). Con estos datos, y las temperaturas consideradas anteriormente, se obtiene una carga total por radiación de $Q = 6.4 \text{ mW}$, si la guía es de aluminio, o de $Q = 2.3 \text{ mW}$, si la guía es de latón. Aunque en ambos casos la carga térmica es despreciable frente a la potencia del refrigerador se han elegido guías de latón por su facilidad para la soldadura.

La existencia del gap de aire entre las guías genera un problema de tipo mecánico en la transición. Estas guías se

encuentran a diferentes temperaturas por lo que se contraen de forma diferente, esto origina que la distancia entre ambas y su alineamiento varíen de forma no predecible. Por tanto se han diseñado unas piezas de material cerámico cuya misión es mantener la distancia entre las guías y su alineamiento, a la vez que proporcionan rigidez mecánica al montaje (ver elemento 5 de la Fig. 1). El material, de baja conductividad térmica, se obtiene a partir del dieléctrico del sustrato de microondas RO4003 de Rogers Corp. ($\epsilon_r = 3.55$, $t = 0.4 \text{ mm}$, $K = 0.64 \text{ W/mK}$) [8]. En la Fig. 5 se muestra un esquema del soporte diseñado.

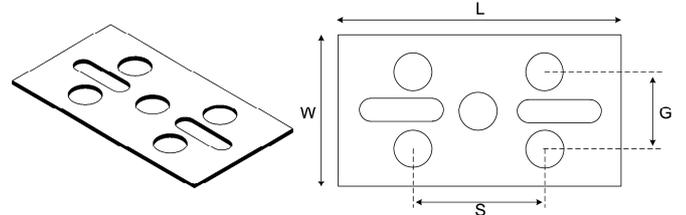


Fig. 5. Soporte cerámico diseñado para mantener la distancia entre guías y el alineamiento de las mismas: $L = 15 \text{ mm}$, $W = 8.1 \text{ mm}$, $S = 7 \text{ mm}$, G ha de ser igual al grosor de la brida de la guía más la distancia d deseada.

El soporte de la Fig. 5 es mecanizado sobre el sustrato mediante fresado. A su vez, han de mecanizarse agujeros roscados en las bridas de las guías a las que es unido. El parámetro G ha de ser mecanizado con precisión puesto que define la distancia de separación entre guías, en este caso es tal que esta separación es $d = 100 \mu\text{m}$. Como en el caso de la ventana de vacío, este gap ha de ser compensado con un choke de RF en una de las guías (elemento 6 de la Fig. 1). En este caso se ha optado por adquirir bridas con choke comerciales, las cuales se sueldan a las guías de latón. En la Fig. 6 se muestra la simulación de los efectos del gap de aire de $100 \mu\text{m}$ con y sin choke.

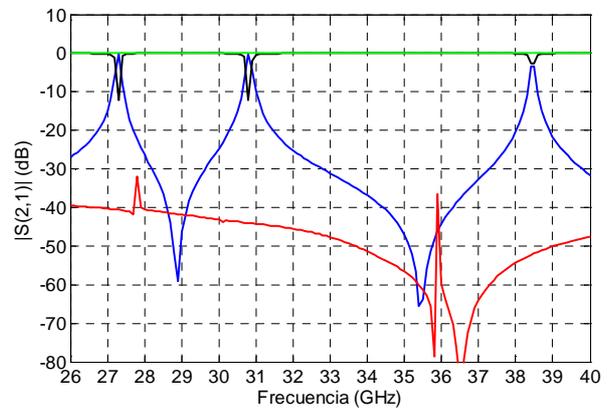


Fig. 6. Simulación de la reflexión y transmisión en el gap de aire: $|S(1,1)|$ sin choke (azul); $|S(1,1)|$ con choke (rojo); $|S(2,1)|$ sin choke (negro); $|S(2,1)|$ con choke (verde).

Finalmente, para reducir la carga térmica por conducción que pudieran generar estos soportes, se mecanizan unas ranuras en la parte central que reducen la sección del material dieléctrico.

III. DISEÑO MECÁNICO

Todos los elementos metálicos son mecanizados en latón con una maquina de control numérico. El latón ofrece algunas ventajas sobre el aluminio como son su facilidad para la soldadura y la simplificación del proceso de dorado, ya que no es necesario el niquelado previo.

IV. CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL

La caracterización experimental de la transición se ha realizado únicamente a temperatura ambiente debido principalmente a dos razones: las pérdidas de retorno son muy difíciles de medir a temperatura criogénica, ya que no se puede acceder a uno de los puertos de la transición; y el cambio en las pérdidas de inserción de la ventana ha de ser muy pequeño (menor que la resolución de la medida) si la barrera térmica funciona correctamente, ya que la única parte realmente fría es la guía que une la barrera térmica con el sistema a medir. La longitud de esta guía es variable dependiendo del sistema a caracterizar y su ubicación dentro del criostato, por tanto en los resultados que se presentan se ha eliminado la contribución de las pérdidas de esta guía, haciéndolos independientes de la guía utilizada.

Para la medida a temperatura ambiente se ha montado la transición de la Fig. 1 en la que se ha utilizado un primer tramo de guía de 3.28 cm y un segundo tramo (elemento 6 de la Fig. 1) de 27.4 cm. Se ha empleado un analizador de redes PNA E8364A de Agilent Technologies conjuntamente con un kit de calibración en guía WR28 R11644A de la misma compañía. Los resultados de esta medida se presentan en la Fig. 7, donde se puede comprobar que la adaptación de esta transición es mejor de 21 dB en la banda WR28, con unas pérdidas de inserción en torno a 0.1 dB.

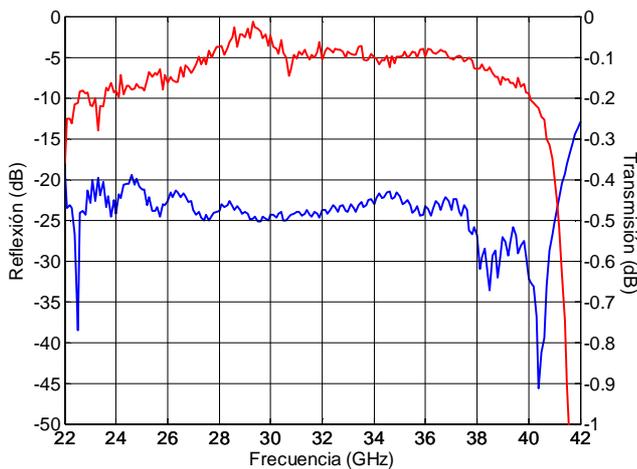


Fig. 7. Medida de la reflexión (azul) y la transmisión (rojo) de la transición diseñada a temperatura ambiente. Se han descontado las pérdidas de inserción del segundo tramo de guía.

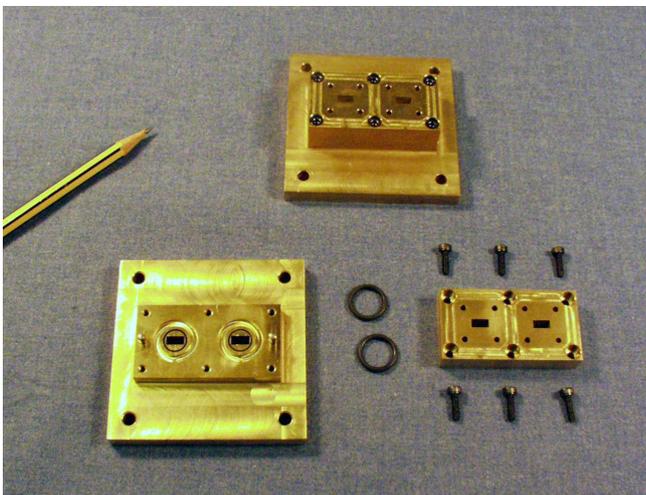


Fig. 8. Imagen de la ventana WR28 diseñada. Se muestran las dos unidades fabricadas, una montada y el despiece de la otra.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado el diseño y caracterización, a temperatura ambiente, de una ventana de acceso a un criostato en la banda WR-28 (26 – 40 GHz). La ventana diseñada cumple los requerimientos mecánicos y eléctricos necesarios para poder caracterizar sistemas enfriados hasta temperaturas criogénicas. El diseño desarrollado posee una barrera física formada por una lámina de Mylar® que, junto con una junta tórica, permite mantener la estanqueidad en el interior del criostato. Además se ha incluido una barrera térmica que permite aislar la zona de medida en el criostato de las líneas de entrada al mismo, evitando un calentamiento excesivo de esta zona. En ambas transiciones, debido a que existe una separación física entre las guías, se ha diseñado un choke de RF que mejora sensiblemente la respuesta eléctrica en la transición. Los resultados mostrados, con unas pérdidas de inserción en torno a 0.1 dB y unas pérdidas de retorno mejores de 21 dB, indican que el comportamiento de la ventana es adecuado para la medida de sistemas en esta banda de frecuencia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren dar las gracias a Juan Daniel Gallego del Centro Astronómico de Yebes, Guadalajara, España, por los consejos dados y la información facilitada. Asimismo, quieren hacer constar su agradecimiento al Ministerio de Educación y Ciencia por el apoyo económico para la realización de este trabajo a través del Programa Nacional de Astronomía y Astrofísica AYA2007-68058-C03-03 y la beca FPI BES-2005-6730.

REFERENCIAS

- [1] J. L. Cano and E. Artal, "Cryogenic Technology Applied to Microwave Engineering", *Microwave Journal*. Pendiente de publicación.
- [2] J. D. Gallego and I. López, "Definition of Measurements of Performance of X Band Cryogenic Amplifiers" *Technical Report C.A.Y 2000-4*, Centro Astronómico de Yebes, Julio 2000.
- [3] J. A. López, J. D. Gallego, P. de Vicente, J. A. Abad and C. Almendros, "Entrada en Guía WR-112 del Criostato de VLBI", *Informe Técnico 1-1994*, Centro Astronómico de Yebes, Abril 1994.
- [4] <http://usa.dupontteijinfilms.com/informationcenter/technicalinfo.aspx>
- [5] A. R. Kerr, N. J. Bailey, D. E. Boyd, and N. Horner, "A Study of Materials for a Broadband Millimeter-Wave Quasi-Optical Vacuum Window", *Electronics Division Internal Report no. 292*, NRAO, Charlottesville, VA, August, 1992.
- [6] J. G. Weisend II, "Handbook of Cryogenic Engineering", Ed. Taylor&Francis. 1998. ISBN 1-56032-332-9.
- [7] T. M. Flynn, "Cryogenic Engineering, 2nd Edition", Ed. Marcel Dekker, 2005. ISBN 0-8247-5367-4.
- [8] Rogers Corporation, www.rogerscorp.com/index.aspx