

Medida de la Permitividad a temperaturas criogénica y ambiente con el método de Perturbación de Cavidad.

I. Malo, J. D. Gallego, M. Diez, I. López, R. García

IT OAN 2010 - 9

*Centro Astronómico de Yebes
Apdo. 148. 19080 Guadalajara. SPAIN
Phone: +34 949 29 03 11 ext.208
Fax: +34 949 29 00 63*

Estimación de la variación de la constante dieléctrica del sustrato 6002 de Rogers y del Mylar del GoodFellow, al modificar la temperatura de 300 K a 20 K, usando la técnica de perturbación de cavidad. Medida de la constante dieléctrica a temperatura ambiente de la membrana del Radiotelescopio de 40 m y de otros posibles materiales que pudieran sustituirla.

Fecha de creación	Wednesday, 07 de July de 2010
Fecha de guardado	Wednesday, 14 de July de 2010
Fecha de impresión	Wednesday, 14 de July de 2010

INDICE

1. Introducción.....	1
2. Caracterización experimental de dieléctricos.....	1
3. Técnica de perturbación de cavidad.....	3
3.1. Teoría y análisis de la técnica de perturbación de cavidad.....	3
3.2. Diseño y construcción de la cavidad resonante.....	6
3.3. Procedimiento de medida.....	7
3.4. Estimación de los errores de medida.....	9
3.5. Resultado de las medidas.....	10
4. Conclusiones finales.....	16
Referencias bibliográficas.....	18

1. INTRODUCCIÓN.

La constante dieléctrica y la tangente de pérdidas son parámetros fundamentales en el diseño de componentes de microondas basados en dieléctricos. Es necesario conocer el valor que tienen a las frecuencias y temperatura de trabajo para las que se diseña el componente. La velocidad de propagación, la longitud de onda y la impedancia característica dependen de la constante dieléctrica, y las pérdidas se relacionan con la tangente de pérdidas. Cualquier anomalía en las propiedades de estos materiales provoca una degradación del comportamiento eléctrico del componente.

Los dieléctricos se caracterizan con su *permitividad*, ϵ , o más habitualmente, con la *permitividad relativa*, ϵ_r (cuya parte real se denomina *constante dieléctrica*) y la *tangente de pérdidas*, $\text{tg}\delta$:

$$\epsilon_r \triangleq \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \qquad \text{tg}\delta \triangleq \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

El Híbrido criogénico de 3 dB y 90° en la banda de 4 a 12 GHz construido en el CAY [1][2] utiliza como sustrato el dieléctrico RT/Duroid 6002 de Rogers. El fabricante aporta las características eléctricas del mismo a temperatura ambiente, en concreto, la constante dieléctrica y la tangente de pérdidas a 23 °C. Sin embargo, se desconoce cómo se modifican estas características al bajar la temperatura del sustrato a 20 K. La experiencia del CAY en el diseño, fabricación y medida de amplificadores criogénicos de ultra bajo ruido [3] muestra que las características de este dieléctrico no varían apreciablemente al trabajar a temperaturas criogénicas. Sin embargo, no se ha realizado ninguna medida específica que lo garantice, ni existe en la literatura ninguna medida de este material a 20 K.

El informe presenta las medidas, con la técnica de perturbación de cavidad, de la constante dieléctrica y la tangente de pérdidas del sustrato 6002 de Rogers en la banda X, para cuantificar la variación que sufren cuando se reduce la temperatura del sustrato de 300 a 20 K. De la misma forma se caracterizará también el Mylar.

Basadas en la misma técnica, se presentan las medidas realizadas en el CAY de la constante dieléctrica de la membrana que cubre el vertex del Radiotelescopio de 40 m y de otros materiales susceptibles de utilizarse en el futuro como membranas del vertex.

En primer lugar, se hace una somera revisión de las distintas técnicas de medida utilizadas en la caracterización experimental de dieléctricos, seleccionando la técnica de perturbación de cavidad, para la cual se presentará la teoría básica sobre la que apoya, se explicará el diseño y construcción de los elementos (cavidad resonante, muestra) y sistema de medida utilizados, se analizarán los resultados de las medidas y se terminará exponiendo las conclusiones obtenidas.

2. CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE DIELECTRICOS.

La caracterización experimental de un material consiste en la medida de las magnitudes que caracterizan su comportamiento electromagnético. En el caso del sustrato de Rogers, consiste en la medida de su permitividad.

Todas las técnicas de medida se basan en medidas indirectas: El dieléctrico a medir (que llamaremos muestra) es “introducido” en un dispositivo (que llamaremos célula de medida), y se mide el comportamiento del dispositivo afectado por la presencia del dieléctrico. En la mayoría de los casos la medida se realiza comparando el comportamiento de la célula de medida con y sin muestra. Esto nos conduce a establecer la teoría básica que permite obtener la relación entre los parámetros del material y las magnitudes medidas. Se elige la célula de medida y la forma de la muestra para que admitan un tratamiento analítico que facilite la obtención de dicha relación.

La Figura 1 presenta una comparación rápida entre distintas técnicas de medida.

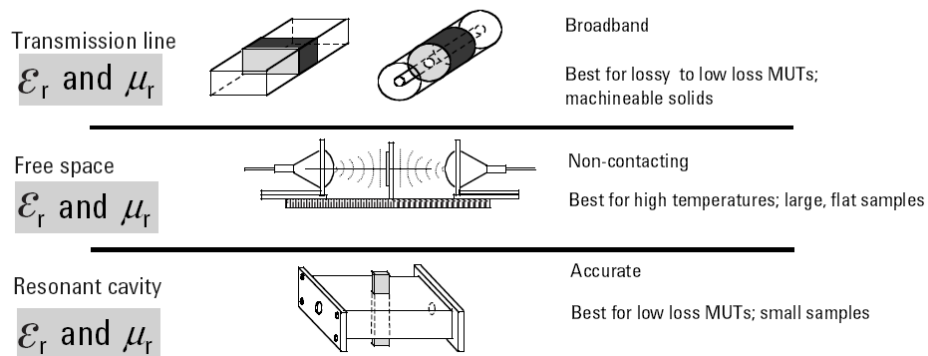


FIGURA 1. TÉCNICAS DE MEDIDA [4].

Las técnicas de medida se pueden clasificar en cuatro familias [5] de la siguiente manera:

Técnicas dependientes de reflexión y transmisión en guías o líneas: Estudian la influencia que la introducción de la muestra tiene sobre la reflexión y/o la transmisión de la onda electromagnética a través de la guía o línea. Requieren situar la muestra dentro de una porción cerrada de línea, habitualmente la sección de una guía rectangular o circular, calculando la permitividad a partir de las medidas en reflexión y en transmisión en la guía; presentan una buena sensibilidad con muestras pequeñas y permiten medidas en banda ancha de materiales magnéticos y/o anisótropos de altas o bajas pérdidas. Sin embargo es necesario adaptar la muestra a la sección de la guía, sin burbujas de aire en las paredes de la guía, y la resolución en el cálculo de las pérdidas está limitada por el tamaño de la muestra. Son adecuadas para estudiar la variación del material respecto a la temperatura.

Técnicas dependientes de reflexión y transmisión en medio libre: El fundamento es similar al anterior, pero la interacción onda-muestra se realiza en el medio libre utilizando generalmente una muestra en forma de lámina. La ventaja es que la muestra no requiere un mecanizado especial y no está en contacto con el sistema de medida, lo que permite testear materiales que se encuentran a alta temperatura; sin embargo, necesita muestras eléctricamente grandes para evitar errores por efectos de bordes, lo que la hace útil en medidas de alta frecuencia. Presentan poca sensibilidad a las pérdidas por lo que son útiles para medir materiales con pérdidas importantes. Permiten realizar medidas en continuo, muy útiles para control en procesos industriales. En esta familia se incluyen también las técnicas de línea o guía con terminación abierta, que consisten en adosar la muestra en forma de lámina (en sólidos) al final de una guía o línea abierta y medir la reflexión en la entrada. Como ejemplo, el método de reflexión basado en una sonda coaxial en abierto [4],

cuyas cualidades son el ser un método de banda ancha, no destructivo con la muestra, bueno para líquidos y semisólidos (pues requiere una superficie plana en sólidos y ausencia de burbujas de aire en la interfaz) si bien su precisión en el cálculo de la permitividad relativa es limitada.

Técnicas de puente: Usando como célula de medida las guías o el espacio libre, la medida se realiza por comparación de dos ondas coherentes que recorren caminos distintos, en uno de los cuales se encuentra la muestra. Son fundamentalmente comparadores de impedancia. La medida consiste en producir la interferencia destructiva entre las dos ondas y detectar un mínimo. Requieren buenos patrones de impedancia (atenuadores y desfasadores) difíciles de conseguir.

Técnicas en resonadores: Se introduce la muestra en un resonador y se mide su influencia en la frecuencia de resonancia y en el factor de calidad Q. Son los métodos más sensibles y preferidos para medida de materiales de bajas pérdidas, no pudiendo usarse en materiales de altas pérdidas. Pueden utilizarse muestras pequeñas pero requieren un mecanizado preciso de la misma y solo permiten medidas a una frecuencia (la de resonancia) o a unas pocas frecuencias (modos de resonancia), si bien, eligiendo adecuadamente el resonador, la medida es posible en cualquier banda de frecuencias.

El sustrato RT/Duroid 6002 de Rogers es un dieléctrico de bajas pérdidas. La experiencia demuestra que sus características varían muy poco al reducir su temperatura a 20 K. Las **técnicas en resonadores** son las que presentan mayor sensibilidad. En este informe se utilizará la técnica de Resonador en cavidad rectangular de banda X, denominada Técnica de perturbación de cavidad.

3. TÉCNICA DE PERTURBACIÓN DE CAVIDAD.

El método de perturbación de cavidad es muy utilizado por ser una de las técnicas más sencillas y precisas. Las medidas se realizan introduciendo una pequeña muestra, de forma apropiada, en una cavidad resonante, determinando las propiedades de la muestra a partir de la variación de la frecuencia de resonancia y del factor de calidad de la cavidad respecto a los de la cavidad vacía. El inconveniente, como en el método de los resonadores en stripline, es que la medida de las características del material es válida solo a una frecuencia, la de resonancia.

Puesto que es posible medir con precisión el cambio en la frecuencia de resonancia, este método permite medir las propiedades eléctricas y magnéticas de la muestra si las propiedades de la cavidad son conocidas, o caracterizar la cavidad si se conocen las propiedades de la muestra [6].

3.1. TEORÍA Y ANÁLISIS DE LA TÉCNICA DE PERTURBACIÓN DE CAVIDAD.

La primera referencia a la teoría de perturbación de cavidad fue dada por Bethe y Schwinger [7]. Posteriormente Casimir [8] extendió la teoría de perturbación de cavidad para incluir la determinación de las propiedades magnéticas de una pequeña esfera. El desarrollo detallado de esta técnica se puede consultar en Chao [9].

Las bases teóricas de esta técnica están bien establecidas pero involucran algunas simplificaciones que hay que examinar cuidadosamente para conocer el efecto que tienen en la precisión de las medidas.

La principal hipótesis del método de perturbación de cavidad consiste en que el cambio en la configuración geométrica de los campos electromagnéticos en la guía, al introducir la muestra, es pequeño. Experimentalmente esto significa que el cambio porcentual en la parte real de la frecuencia de resonancia debe ser pequeño [10]. Basándose en esta suposición, y asumiendo que las paredes de la cavidad son conductores perfectos, Waldron desarrolló detalladamente en [11][12] la expresión para el desplazamiento de la frecuencia de resonancia compleja al introducir la muestra en la cavidad resonante (1).

$$\frac{\Delta w}{w_o} = \frac{\iiint_{V_s} [(E D_o - E_o D) - (H B_o - H_o B)] dV}{\iiint_{V_o} [(E_o D_o - H_o B_o)] dV} \quad (1)$$

expresando los campos en la cavidad sin muestra como:

$$E_o \cdot e^{-jw_o t} \quad H_o \cdot e^{-jw_o t}$$

En la expresión (1), E_o , D_o , H_o y B_o son los campos en la cavidad, que se asume tienen la misma configuración que los modos en la cavidad no perturbada (sin muestra), E , D , H y B son los campos en el interior de la muestra perturbadora, V_s y V_o son los volúmenes de la muestra y de la cavidad respectivamente, w_o es la frecuencia de resonancia compleja de la cavidad no perturbada y Δw lo que varía w_o al introducir la muestra. El término $\Delta w/w_o$ se puede separar en parte real y parte imaginaria según la relación (2):

$$\frac{\Delta w}{w_o} = \frac{\Delta f_o}{f_o} + j\Delta \left(\frac{1}{2Q_o} \right)$$

donde:

$$\Delta \left(\frac{1}{2Q_o} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_o} \right) \quad (2)$$

Si $\Delta w \ll w_o$, se puede aproximar:

$$\frac{\Delta f_o}{f_o} = \frac{f_s - f_o}{f_o} \approx \frac{f_s - f_o}{f_s}$$

siendo f_o , Q_o la frecuencia de resonancia y el factor de calidad de la cavidad vacía y f_s , Q_s las de la cavidad con la muestra.

Como comenta Waldron, la alta precisión de la fórmula (1) solo puede alcanzarse si la forma de la muestra se elige correctamente (de forma que sea posible calcular E , D , H y B) y se sitúa adecuadamente dentro de la cavidad.

Para simplificar la fórmula de perturbación (1) es necesario asumir algunas hipótesis adicionales:

- La muestra perturbadora está hecha de un material isótropo homogéneo. De esta forma, \mathbf{D} y \mathbf{B} se pueden expresar en términos de \mathbf{E} y \mathbf{H} , de la permitividad compleja, ϵ_r^* , y de la permeabilidad compleja, μ_r^* , del material, lo que simplifica (1) según:

$$\frac{\Delta w}{w_o} = - \frac{\epsilon_o(\epsilon_r^* - 1) \iiint_{V_s} \mathbf{E}\mathbf{E}_o dV + \mu_o(\mu_r^* - 1) \iiint_{V_s} \mathbf{H}\mathbf{H}_o dV}{\iiint_{V_o} (\mathbf{E}_o\mathbf{D}_o - \mathbf{H}_o\mathbf{B}_o) dV} \quad (3)$$

- La muestra no es magnética. Por tanto $\mu_r = 1$, desapareciendo el segundo término del numerador de (3).
- En una cavidad resonante la energía eléctrica almacenada es igual a la energía magnética almacenada, simplificando (3) según (4):

$$\frac{\Delta w}{w_o} = - \frac{(\epsilon_r^* - 1) \iiint_{V_s} \mathbf{E}\mathbf{E}_o dV}{2 \iiint_{V_o} |\mathbf{E}_o\mathbf{E}_o| dV} \quad (4)$$

- Si la cavidad es rectangular (denominando al lado ancho “a”, al estrecho “b” y a su longitud “l”) y se propaga el modo TE_{10p}, el campo eléctrico total se escribe como:

$$\mathbf{E}_o = E_{o_{max}} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{p\pi z}{l}\right) \hat{y}$$

que aplicado al denominador de la expresión (4) resulta:

$$\iiint_{V_o} |\mathbf{E}_o\mathbf{E}_o| dV = \frac{V_o}{4} (E_{o_{max}})^2 \quad (5)$$

- Si la muestra se sitúa en un máximo del campo eléctrico, se cumple que $|\mathbf{E}| = E_{o_{max}}$. Si, además, la longitud de la muestra es igual al lado estrecho de la cavidad, “b”, y la muestra es lo suficientemente delgada para que el campo eléctrico en su interior sea uniforme, se cumple que $\mathbf{E} = E_{o_{max}} \hat{y}$, y de esta forma la expresión (4) se simplifica resultando en:

$$\frac{\Delta w}{w_o} = - \frac{(\epsilon_r^* - 1)V_s}{2V_o} \quad (6)$$

A partir de las expresiones (2) y (6) se obtienen las fórmulas (7) que relacionan la parte real e imaginaria de la permitividad relativa con las frecuencias de resonancia y factores de calidad de la cavidad con (f_s , Q_s) y sin muestra (f_o , Q_o) y los volúmenes de cavidad, V_o , y de muestra, V_s , según (7):

$$\epsilon_r' = 1 + \frac{V_o}{2V_s} \frac{f_s - f_o}{f_o} \quad \epsilon_r'' = \frac{V_o}{4V_s} \left(\frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_o} \right) \quad (7)$$

La tangente de pérdidas del material se calcula según (8):

$$\text{tg } \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (8)$$

3.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CAVIDAD RESONANTE.

Para utilizar la técnica de perturbación de cavidad en la caracterización de materiales es necesario fabricar una cavidad resonante a la frecuencia deseada, de alto factor de calidad, Q , con un acoplamiento al exterior tal que su Q no se vea afectado por el Q del sistema de medida (también llamado Q externo).

La técnica de perturbación de cavidad solo permite medir a una frecuencia. Puesto que la banda de trabajo del híbrido es de 4 a 12 GHz, resulta conveniente medir las características del sustrato y del Mylar en la zona central de esa banda.

Las dimensiones de la cavidad rectangular son $a = 22.86$ mm y $b = 10.2$ mm, similares a las de la guía WR90. La cavidad se construye a partir de un bloque de latón, utilizando la fresadora de control numérico del CAY (cuya precisión es de ± 20 μ m). La guía se dora con aproximadamente 4 μ m de espesor de oro blando de alta pureza (PUR-A-GOLD@202B del fabricante Cookson Electronics¹), lo que aumenta el Q de la cavidad resonante. El valor del Q de la guía dorada en vacío se encuentra en torno a 4900.

La cavidad resonante se obtiene colocando un iris a la entrada y salida de la cavidad. El iris es una lámina de 1 mm de espesor de latón dorado, con una apertura circular (iris) en el centro, eléctricamente pequeña, que permite el acoplamiento por dipolo magnético [13] de la cavidad al exterior. El diámetro de la apertura, de 3.2 mm, se elige como compromiso entre una transmisión suficiente para que la medida con el VNA no sea ruidosa y un bajo acoplamiento (para que la medida del Q de la cavidad no se vea degradada por el Q del sistema de medida). Con esta apertura se obtienen valores de $|s_{21}|$ en torno a -50 dB. Según la expresión (9), donde Q_U (“unloaded”) es el Q interno de la cavidad, Q_L (loaded) es la suma del Q interno y el Q externo, e IL son las pérdidas de inserción en dB, para un Q_L de 4900 y unas IL de 50 dB, el Q_U es de 4916, apenas una variación del 0.3%. Por tanto el acoplamiento con una apertura de 3.2 mm es adecuado.

$$Q_U = \frac{Q_L}{1 - 10^{-IL/20}} \quad (9)$$

La cavidad, de longitud $l = 27$ mm, trabaja en el modo TE_{101} , cuya frecuencia de resonancia, calculada teóricamente a partir de (10), con la permitividad relativa del aire ($\epsilon_r' = 1.00059$), es de 8.58918 GHz.

$$f_r = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r'}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{l}\right)^2} \quad (10)$$

El máximo de campo \mathbf{E} se encuentra en el centro de la cavidad. Para ubicar la muestra en dicho máximo, se perfora en el centro de la cavidad un agujero de 2 mm de diámetro que atraviesa las dos caras anchas de la cavidad. Gracias a estos agujeros la muestra atraviesa la cavidad de lado a lado asegurando que se cumple la hipótesis e) del apartado anterior, esto es, que se sitúa en el máximo del campo eléctrico y que la longitud de la muestra dentro de la cavidad es igual al lado estrecho de la cavidad, “ b ”. Para facilitar la medida en coaxial, se utilizan dos transiciones guía-coaxial del

¹Cookson Electronics One Cookson Place, Providence, Rhode Island 02903, EEUU.

fabricante Suhner, modelo 3102 (actualmente descatalogado). La cavidad resonante se muestra en la Figura 2.



FIGURA 2. CAVIDAD RESONANTE, MUESTRA Y TRANSICIONES GUÍA-COAXIAL.

3.3. PROCEDIMIENTO DE MEDIDA.

Todas las medidas de la cavidad resonante, con y sin muestra, se hacen con la cavidad dentro del criostato, tanto si son a temperatura ambiente como a criogénica, lo que permite su comparación, como se muestra en la Figura 3. Tanto el criostato como el VNA Agilent E8364B son los mismos que utilizamos en las medidas del híbrido.

La medida de la frecuencia de resonancia y del ancho de banda a 3dB de la cavidad resonante (con los que se calcula el Q) se realiza con el VNA a partir de la medida del parámetro S en transmisión, s_{21} . Un factor clave para obtener resultados precisos con la técnica de perturbación de cavidad es la habilidad para medir en frecuencia con precisión. Por esta razón se configura el VNA para que posicione los markers “en continuo”, con lo que se obtiene tanto la frecuencia del máximo del $|s_{21}|$ como el ancho de banda a 3dB interpolando entre las medidas discretas que realiza. Además, el ancho de banda del filtro de IF se fija en 10 Hz, el span en 5 MHz, con 401 puntos, y el Sweep Setup se establece en “Stepped Sweep – sweep moves in discrete steps”.

Sin embargo, el cálculo del volumen de la muestra es la fuente de error más importante (esta conclusión se desarrolla en el apartado “análisis de error”). Es difícil estimar con precisión el volumen de una muestra a partir de la medida de sus dimensiones debido a su reducido tamaño y a la dificultad para obtener muestras con forma cilíndrica o de paralelepípedo rectangular con precisiones del orden de centésimas de milímetro. Para salvar este inconveniente, se calcula su volumen a partir de la densidad del material y de la masa de la muestra. La densidad del material, d , se calcula a partir de la masa, m_{sp} , y de las dimensiones (volumen, V_{sp}) de una muestra de mayor tamaño, que llamaremos muestra patrón: La masa se obtiene con la balanza de precisión² (cuya resolución es de 0.1 mg), el espesor de la muestra (dimensión en el eje z) se mide con ayuda del micrómetro y las dimensiones de la muestra patrón en los ejes x e y se miden con el calibre, teniendo en cuenta que, al ser el tamaño de la muestra patrón del orden de 50 veces mayor que el

² Modelo Crystal 200 del fabricante Gibertini Elettronica, Via Bellini 37, 20026 Novate Milanese (MI)–Italia9644

de la muestra, se requiere menor precisión en el corte para obtener un valor preciso de la densidad. Esto es, un error de 0.1 mm en las dimensiones x e y se traduce en un error en V_s del 1% con el método de la muestra patrón, frente al 11% si no lo utilizáramos. Con la densidad y la masa de la muestra, m_s , medida también con la balanza de precisión, se obtiene el volumen de la muestra, V'_s , a partir del cual se obtiene el volumen de la muestra que se encuentra dentro de la cavidad resonante, V_s . El volumen de la cavidad resonante es $V_o = 6283.636 \text{ mm}^3$.

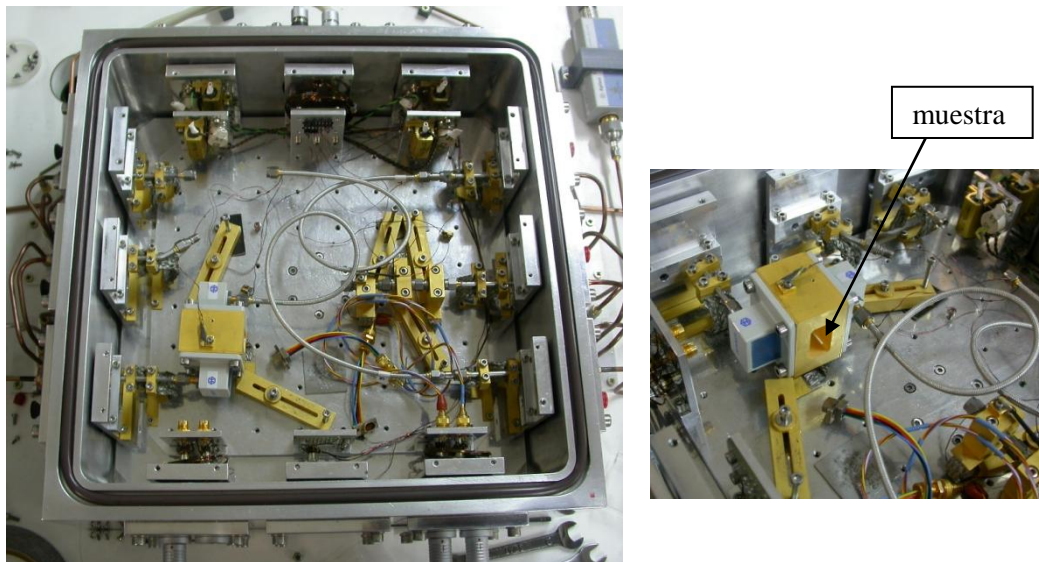


FIGURA 3. CRIOSTATO DE MEDIDA DE LA CAVIDAD RESONANTE. EN LA FOTO AMPLIADA SE OBSERVA LA MUESTRA DENTRO DE LA CAVIDAD.

Material	m_{sp} [gr]	V_{sp} [mm ³]	d [gr/mm ³]	m_s [gr]	V'_s [mm ³]	V_s [mm ³]
CuFlon 31mills	11.912 5	5348.258 (99.065x66.08x0.817*)	2.227×10^{-3}	0.2018	90.6152 (l=66.08 mm)	13.9644 (l=10.185 mm)
R6002 10mills	3.2202	1576.3546 (100.75x58.60x0.267*)	2.043×10^{-3}	0.0577	28.2454 (l=58.60 mm)	4.9090 (l=10.185 mm)
R6002 20mills	2.1307	1042.334 (31.8x63.4x0.517*)	2.0441	0.0988	48.3342 (l=63.36 mm)	7.7696 (l=10.185 mm)

(*) El espesor de los sustratos, medido con el micrómetro, es ligeramente superior al valor típico que especifica el fabricante, pero está dentro de la tolerancia de fabricación.

Las medidas a temperatura criogénica involucran dos ciclos de enfriamiento. El primero, para medir la cavidad sin muestra a temperatura criogénica, y el segundo, para medir la cavidad con muestra a temperatura criogénica. Sin embargo, hemos observado que, tras el primer enfriamiento, las características de la cavidad resonante se degradan, esto es, el Q disminuye un 20% aproximadamente. Tras un segundo ciclo de enfriamiento, el Q solo se degrada ligeramente, menos de un 3%. Dentro del criostato el vacío no es perfecto, hay partículas de agua, vapor de aceite proveniente de la bomba que hace el vacío, oxígeno, nitrógeno, etc, que se adhieren eficientemente a la superficie rugosa del oro cuando se encuentra a temperatura criogénica. Para intentar comprender qué partículas son las que se adhieren a la cavidad, se realiza un proceso de limpieza. La cavidad se limpia en ultrasonidos con acetona durante 30 minutos, después con alcohol durante el mismo tiempo y por último se mete en vacío durante una hora. Sin embargo, el Q de la cavidad no mejora. La cavidad se calienta a 120 °C durante una hora, después de lo cual el Q de la cavidad vuelve a su valor original. Esto nos hace pensar que, probablemente, son partículas de agua las que

se adhieren a la superficie de la cavidad cuando se enfría a temperaturas criogénicas, y que posteriores enfriamientos no degradan más su factor de calidad probablemente porque la superficie ya se ha saturado de partículas. La conclusión es que es necesario realizar un ciclo de enfriamiento previo, de manera que, en el primer ciclo de enfriamiento, la cavidad se sature de partículas externas, y en el segundo y tercer ciclo se realizan las medidas de la cavidad con y sin muestra.

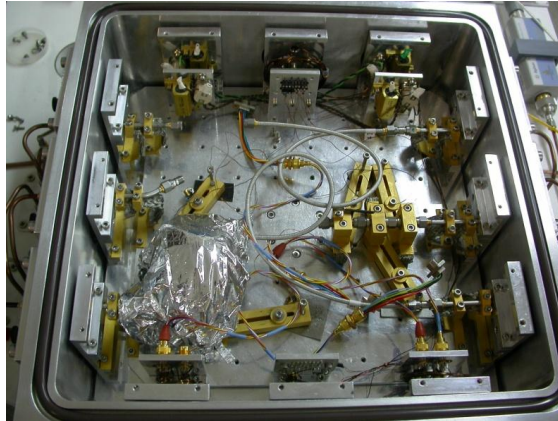


FIGURA 4. EL MLI ENVUELVE LA CAVIDAD RESONANTE CON LA MUESTRA PARA MINIMIZAR LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN EXTERNA.

La cavidad resonante se enfría por el mecanismo de conducción por sólidos, al estar en contacto físico con la placa fría del criostato. Se coloca un sensor de temperatura en la cavidad para medir la temperatura que alcanza. La muestra, sin embargo, se enfría principalmente por el mecanismo de radiación desde la cavidad. Para evitar que la carga por radiación de zonas más calientes del criostato eleve la temperatura de la muestra por encima de la temperatura de la cavidad, se envuelve la cavidad con la muestra con cuatro capas de MLI³, como se observa en la Figura 4.

3.4. ESTIMACIÓN DE LOS ERRORES DE MEDIDA.

Los errores de medida de la constante dieléctrica y la tangente de pérdidas se obtienen estimando su desviación estándar mediante la “ley de propagación de la incertidumbre”, según propone el NIST [14], asumiendo que las variables de las que dependen son incorreladas y que tienen distribuciones estadísticas gaussianas, y estableciendo un intervalo de confianza del 95% (que equivale a $\pm 2\sigma$). El cálculo de la estimación de los errores se incluye en el Anexo 1 y el resultado se resume en la Tabla 1.

La fuente principal de error en la medida de la constante dieléctrica es la estimación del volumen de la muestra, ya que su derivada parcial (denominada coeficiente de sensibilidad) con respecto a V_s es la de mayor peso.

³ El MLI o “multilayer insulation” consiste en un material de baja conductividad térmica recubierto de una capa altamente reflectora. El MLI utilizado es “NRC-2 crinkled aluminized Mylar film 0.006 mm”, que consiste en una capa reflectora de aluminio (de entre 30 y 40 μm de espesor) depositada en vacío sobre una hoja de Mylar de 6 μm de espesor. La conductividad térmica es muy baja, 42 $\mu\text{W/m K}$ [1]. El material está arrugado (“crinkled”) lo que reduce el contacto entre capas a solo unos pocos puntos, reduciendo así la conducción por sólidos. La capa reflectora minimiza la transferencia de calor por radiación.

<i>Material</i>	$2\sigma (\epsilon_r)$	$2\sigma (tg\delta)$
Rogers 6002 – 20 mils	0.024	$8.6 \cdot 10^{-5}$
Rogers 6002 – 20 mils @ 20 K	0.024	$17.2 \cdot 10^{-6}$
Rogers 6002 – 10 mils	0.038	$12.0 \cdot 10^{-5}$
CuFlon	0.008	$3.4 \cdot 10^{-5}$
Teflón	0.108	$3.4 \cdot 10^{-5}$
Mylar	0.064	$19.2 \cdot 10^{-5}$
Mylar @ 20 K	0.064	$6.4 \cdot 10^{-5}$

TABLA 1. ESTIMACIÓN DE LOS ERRORES DE MEDIDA PARA CADA MATERIAL.

Las medidas a temperatura criogénica contienen un error de medida relacionado con la contracción que con la temperatura sufre tanto el volumen de la cavidad como el volumen de la muestra. No es posible corregir este error ya que en la literatura no existen datos de los coeficientes de dilatación a temperaturas criogénicas para las muestras utilizadas.

3.5. RESULTADO DE LAS MEDIDAS.

Para chequear la precisión de la técnica de medida se miden dieléctricos conocidos: Teflón y CuFlon.

TEFLÓN.

Se construye una muestra cilíndrica de teflón, de diámetro medio 1.5 mm, y por tanto, V_s vale 17.998 mm^3 . Las medidas se comparan con las encontradas en la literatura en la Tabla 2. El valor de la constante dieléctrica coincide bien. Sin embargo, hay cierta diferencia en el valor de la tangente de pérdidas.

<i>Teflón</i>	f_o [GHz]	f_s [GHz]	Q_o	Q_s	V_o [mm ³]	V_s [mm ³]	ϵ'_r	$tg \delta$
Muestra	8.578675	8.529250	4930.9	4723.1	6283.636	17.998	2.01	0.39×10^{-3}
NIST [15]		9.000000	Método de la stripline				2.055	0.20×10^{-3}
Murthy [16]		9.111000	Método perturbación de cavidad (cav. rectangular)				2.060	0.80×10^{-3}

TABLA 2. MEDIDAS DE LA CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL TEFLÓN.

La dificultad para mecanizar la muestra cilíndrica de teflón hace que su diámetro no sea uniforme a lo largo de la muestra y, por tanto, tampoco lo sea el volumen de la muestra, lo que se traduce en un error en la medida de la constante dieléctrica de ± 0.1 , por lo que es preferible utilizar otro material para chequear el sistema de medida.

CUFLON

El dieléctrico de este sustrato es PTFE (comercialmente denominado Teflón). La medida de este material permite chequear el sistema de medida, incluyendo el método utilizado para estimar el volumen de la muestra a partir de la medida de la densidad del material.

Se obtiene una muestra patrón del dieléctrico que forma el sustrato CuFlon⁴ cortando la muestra con ayuda de la cizalla y eliminando la metalización (cobre) químicamente (introduciendo la

⁴ Del fabricante Polyflon, a Crane Co. Company. One Willard Road, Norwalk, CT 06851 USA.

muestra en una disolución a 300 gr/l de cloruro férrico, a 60 °C). Con la muestra patrón se estima la densidad del dieléctrico y el volumen de la muestra, como se explicó en el “Procedimiento de medida”.

<i>CuFlon –31 mils</i>	<i>T</i> [K]	<i>f</i> [GHz]	<i>Q</i>	ϵ'_r	<i>tg δ</i>	<i>Método de medida</i>
Con muestra (eje x)	297	8.542064	4798.7	2.001±0.008	(0.14±0.03) x 10 ⁻³	Perturbación de cavidad
Sin muestra	297	8.580075	4858.7			
Crane (eje z)	296	18.00000	-	2.05±0.05	0.45 x 10 ⁻³	IPC-TM-650

TABLA 3. MEDIDAS DE LA CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL CUFLON. COMPARACIÓN CON DATOS DEL FABRICANTE.

Los resultados se muestran en la Tabla 3. La medida se realiza sobre el eje x de la muestra, mientras que el fabricante aporta el dato medido sobre el eje z (que es el eje que define el espesor del sustrato). Por ser el sustrato solo de PTFE es muy probable que su comportamiento sea isótropo, por lo que no estaríamos introduciendo un error adicional al cambiar la dirección en que se mide el sustrato.

La conclusión que se obtiene a partir de las medidas por el método de perturbación de cavidad del Teflón y del CuFlon es que la estimación de la constante dieléctrica es bastante fiable, con un error máximo del 3% respecto de su valor nominal, y que la estimación de la tangente de pérdidas presenta un error mucho mayor, si bien el orden de magnitud del valor de la tangente de pérdidas se estima correctamente.

SUSTRATO ROGERS 6002 – 20 MIL

El dieléctrico de este sustrato es un compuesto de cerámicas y PTFE, con mejores características de mecanizado y de estabilidad eléctrica y mecánica que el PTFE.

Se obtuvo una muestra patrón del dieléctrico del sustrato de Rogers 6002 de 20 mil con el mismo procedimiento utilizado para el CuFlon. En el segundo ciclo de enfriamiento se midió la cavidad con muestra y en el tercer ciclo la cavidad sin muestra. Los resultados, a temperatura criogénica y a temperatura ambiente, se muestran en la Tabla 4, junto con los datos del fabricante a temperatura ambiente.

<i>R6002 – 20 mil</i>	<i>T</i> [K]	<i>f</i> [GHz]	<i>Q</i>	ϵ'_r	<i>tg δ</i>	<i>Método de medida</i>
Con muestra (eje x)	17.6	8.575966	7505.0	2.80±0.02	(1.8±0.09) x 10 ⁻³	Perturbación de cavidad
Sin muestra	17.6	8.614138	9215.3			
Con muestra (eje x)	295.4	8.540116	3358.0	2.776±0.02	(1.2±0.02) x 10 ⁻³	
Sin muestra	295.9	8.577623	3560.5			
Rogers (eje z)	296	10.00000	-	2.94±0.04	1.2 x 10 ⁻³	IPC-TM-650

TABLA 4. MEDIDAS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUSTRATO ROGERS 6002 – 20 MIL. COMPARACIÓN CON DATOS DEL FABRICANTE.

Para obtener conclusiones a partir de estas medidas hay que considerar varios aspectos:

- Los datos del fabricante están especificados a 10 GHz frente a los 8.5 GHz en que han sido medidos por nosotros.
- La medida se ha realizado en distinta dirección: El fabricante mide el sustrato en el eje z, que define el espesor del sustrato, que es como se utilizaría este sustrato en una estructura

stripline o microstrip, mientras que nuestra medida se hizo en la dirección x o y del sustrato, y no es posible realizarla en la dirección z . Si el sustrato no es isótropo, la constante dieléctrica podría tener distinto valor en cada dirección y, por tanto, los datos no serían comparables.

- La medida a temperatura criogénica no tiene en cuenta la reducción de los volúmenes de la cavidad y de la muestra. Los datos de la expansión lineal térmica integrada del sustrato entre 300 y 20 K no están disponibles en la literatura. El fabricante destaca la alta estabilidad dimensional del sustrato, cuyos coeficientes de expansión en los ejes x e y se adaptan a los del cobre (16 ppm/°C) y el coeficiente en el eje z (20 ppm/°C) es ligeramente distinto, en el rango de temperatura de -55°C a 125°C. Sin embargo el rango de temperatura en que se especifican los coeficientes de expansión no cubre hasta los 20 K en que se realiza la medida. Por tanto, si bien es posible que el cociente de volúmenes no varíe de forma importante con la temperatura, la estimación de la constante dieléctrica y la tangente de pérdidas a temperatura criogénica tendrá cierto error. Para cuantificar este error, se toman la expansión lineal térmica integrada entre 300 y 20 K del teflón (cuya contracción es mucho mayor que la del sustrato) y del cobre (que será parecida a la del latón) [17], obteniendo un error en la estimación de la constante dieléctrica del 2.6 % y en la tangente de pérdidas del 5 %. En realidad el error cometido será menor puesto que la contracción del sustrato es menor que la del teflón y más parecida a la del latón.

El fabricante resalta la alta estabilidad térmica de la constante dieléctrica de este material. En concreto, la especificación es de 12 ppm/°C, a 10 GHz, en el rango de temperatura 1-100°C.

La variación con la temperatura de la constante dieléctrica es menor del 1 %, y por tanto, menor que la variación del valor de la constante dieléctrica especificada por el fabricante. **La conclusión principal es que la variación con la temperatura de la constante dieléctrica de este sustrato es despreciable, y por tanto, los diseños a temperatura ambiente son válidos a temperatura criogénica.**

Sin embargo, el valor típico de la constante dieléctrica especificado por el fabricante y el medido por nosotros, ambos a temperatura ambiente, difieren en un 5 % aproximadamente. La fiabilidad de la estimación de la constante dieléctrica por el método de perturbación de cavidad a temperatura ambiente ha sido comprobada con la medida del CuFlon. La constante dieléctrica medida por nosotros con la técnica de resonadores en stripline es de 2.78. Se decide medir otro sustrato Rogers 6002, de menor espesor y diferente año de fabricación, para corroborar esta diferencia.

SUSTRATO ROGERS 6002 – 10 MIL

Este sustrato, del mismo fabricante y características eléctricas que el Rogers 6002 – 20 mil, fue adquirido hace diez años. El objetivo de esta medida es comparar los resultados de este sustrato con los obtenidos para el sustrato de 20 mil adquirido hace dos años.

<i>R6002 – 10 mil</i>	T [K]	f [GHz]	Q	ϵ'_r	$tg \delta$	<i>Método de medida</i>
Con muestra (eje x)	299	8.555221	3588.2	2.78±0.04	$(1.6±0.12) \times 10^{-3}$	Perturbación de cavidad
Sin muestra	299	8.578958	3770.3			
Rogers (eje z)	296	10	-	2.94±0.04	1.2×10^{-3}	IPC-TM-650

TABLA 5. MEDIDAS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUSTRATO ROGERS 6002 – 10 MIL. COMPARACIÓN CON DATOS DEL FABRICANTE.

Los resultados de la medida se presentan en la Tabla 5, comparados con los datos del fabricante. La constante dieléctrica a temperatura ambiente medida para el sustrato de Rogers 6002 de 10 mil es igual que la medida para el sustrato de Rogers 6002 de 20 mil.

El valor de la constante dieléctrica medido por nosotros a temperatura ambiente mediante el método de los resonadores en stripline a 8 GHz es 2.76, similar al obtenido por el método de perturbación de cavidad. Puesto que un método mide la constante dieléctrica en la dirección z y el otro en la dirección xy , podemos concluir que:

- *La constante dieléctrica del sustrato es isotrópica.*
- *El valor de la constante dieléctrica del sustrato Rogers 6002 especificado por el fabricante tiene un error del 5%. El valor medido por nosotros es 2.78 ± 0.04 .*

MYLAR.

El politereftalato de etileno, llamado comercialmente Mylar, utilizado en el Híbrido es del fabricante GoodFellow⁵. Es una lámina de solo 23 μm de espesor, por lo que la muestra se compone de ocho láminas de mylar superpuestas una sobre otra, cuyo volumen total es $V_s = 2.6416 \text{ mm}^3$. Los resultados se muestran en la Tabla 6. La constante dieléctrica, a temperatura ambiente, es muy similar a la especificada por el fabricante. La tangente de pérdidas depende de la frecuencia, por lo que no es posible comparar nuestra medida, a 8.6 GHz, con el dato que ofrece el fabricante, a 1 KHz.

En la medida a temperatura criogénica no es posible incluir el efecto de la contracción de los volúmenes de cavidad y muestra con la temperatura, porque se desconoce el coeficiente de expansión térmica del mylar a temperaturas criogénicas. Esto introduce un error de medida no cuantificable a temperatura criogénica.

Conclusión: *La variación con la temperatura de la constante dieléctrica del Mylar es despreciable*

<i>Mylar</i>	<i>T</i> [K]	<i>f</i> [GHz]	<i>Q</i>	ϵ'_r	$tg \delta$
Con muestra	18.0	8.601268	7644.3	3.02±0.06	$(4.7 \pm 0.06) \times 10^{-3}$
Sin muestra	19.4	8.615819	9346.7		
Con muestra	298.3	8.577713	4057.0	2.98±0.06	$(4.6 \pm 0.19) \times 10^{-3}$
Sin muestra	298.3	8.563013	3657.2		
Goodfellow				3.00 (1 MHz)	2.0×10^{-3} (1 KHz)

TABLA 6. MEDIDAS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL MYLAR. COMPARACIÓN CON LOS DATOS DEL FABRICANTE.

MEMBRANA QUE CUBRE EL VERTEX.

El vertex del radiotelescopio de 40 m está cubierto con una membrana que protege la cabina de receptores de la lluvia. Se utiliza la técnica de perturbación de cavidad para medir la permitividad relativa y tangente de pérdidas del material del que está hecha la membrana a la frecuencia de resonancia de la cavidad, que es unos 8.5 GHz.

⁵ Units C1 & C2, Spitfire Close, Ermine Business Park, Huntingdon, PE29 6WR. England.

Para estudiar si el material es isótropo, se cortan y miden dos muestras rectangulares. Una muestra, que denominaremos $M1$, se corta en el sentido de las fibras (los lados del rectángulo son paralelos o perpendiculares a las fibras) y la otra muestra, $M2$, en el sentido que forma 45° con las fibras. La conclusión es que el material es isótropo, puesto que las características medidas varían dentro del margen de error de la propia medida.

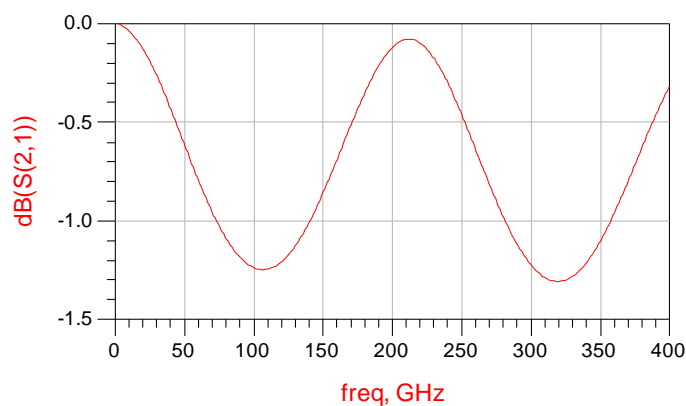
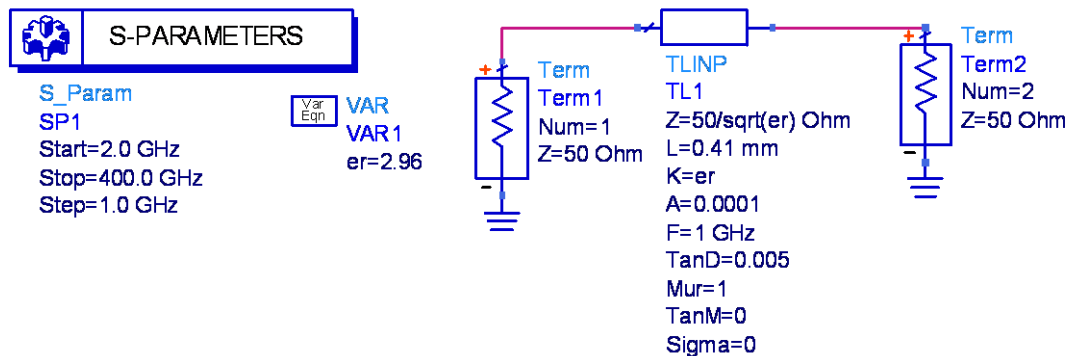
Las medidas se realizan a temperatura ambiente (295 K). Los resultados se presentan en la Tabla 7. La parte real de la permitividad relativa medida es 2.97 y la tangente de pérdidas está en torno a 4.77×10^{-3} .

Muestra	f_o [GHz]	f_s [GHz]	Q_o	Q_s	V_o [mm ³]	V_s [mm ³]	ϵ'_r	$tg \delta$
M1	8.579126	8.537738	4903.7	3656.7	6295.664	7.773	2.96	4.75×10^{-3}
M2	8.579126	8.545288	4903.7	3823.0	6295.664	6.291	2.98	4.80×10^{-3}
M1 agua	8.577988	8.536463	4309.0	3264.0	6295.664	7.773	2.97	5.06×10^{-3}

TABLA 7. MEDIDAS DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA MEMBRANA.

Cuando llueve la membrana se moja. Para estudiar el comportamiento del material tras la lluvia, se sumerge la muestra $M1$ en agua, durante una hora, se eliminan las gotas que quedan en superficie y se mide. El resultado se muestra en la tabla anterior como $M1$ agua. La conclusión es que el material apenas absorbe agua, manteniendo sus características eléctricas tras la lluvia.

La permitividad relativa de este material, tan distinta de la permitividad del aire, junto con el espesor del mismo, 0.41mm, plantea un gran inconveniente: La transmisión presenta un mínimo a 100 GHz, lo que supone pérdidas de inserción de 1.2 dB a esa frecuencia. Esto se obtiene a partir de una simple simulación con la herramienta ADS:



POLIETILENO EXPANDIDO.

Debido a los inconvenientes que plantea la membrana, se estudia la posibilidad de fabricarla de polietileno expandido. El objetivo es caracterizar este material.

Puesto que resulta muy complicado obtener una muestra de 2 mm de diámetro, para poder introducirla dentro de la cavidad resonante, debido a que las burbujas de aire tienen dimensiones parecidas, se corta una muestra ligeramente mayor y se coloca en el máximo de campo E del resonador en guía. Utilizando la técnica de perturbación de cavidad, se mide la muestra, a 295 K de temperatura, y se obtienen los siguientes resultados (Tabla 8):

Muestra	f_o [GHz]	f_s [GHz]	Q_o	Q_s	V_o [mm ³]	V_s [mm ³]	ϵ'_r	$tg \delta$
M	8.579126	8.564038	4903.7	4709.6	6295.664	301.7	1.02	4.31x10 ⁻⁵

TABLA 8. MEDIDA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL POLIETILENO EXPANDIDO.

Para asegurar que la técnica de perturbación de cavidad da resultados correctos, a pesar de que las dimensiones de la muestra son mayores, se utiliza otra técnica de medida: Se mide la guía completamente rellena de polietileno expandido, y se calcula el valor de ϵ'_r , a partir de la medida de la frecuencia de resonancia y la expresión que calcula dicha frecuencia en función de las dimensiones de la guía (10). El valor obtenido para ϵ'_r , es prácticamente el mismo, 1.03.

ZOTEFOAMS

Otra alternativa a la membrana son las espumas de polietileno LD60 y HD30 del fabricante ZOTEFOAMS⁶. Las letras, LD o HD indican si es polietileno de baja o de alta densidad, respectivamente; los números, 60 o 30, indican la densidad nominal de la espuma, en Kg/m³. Las muestras tienen un espesor de 10 mm y están coloreadas. El objetivo es caracterizar este material.

El volumen de las muestras se estima mediante el método descrito en el apartado 3. Medidas. Las densidades estimadas a partir de la muestra patrón son: 24.2 Kg/m³ para el HD30 y de 51.4 Kg/m³ para el LD60.

La variación del Q al introducir la muestra es tan pequeña que, para reducir las fluctuaciones, las medidas son el resultado del promedio de diez medidas consecutivas. La tangente de pérdidas se encuentra en el límite de los valores mínimos que pueden medirse con este método, por lo que solo se indica el orden de magnitud en que se encuentra. Los resultados se muestran en la Tabla 9.

Muestra	f_o [GHz]	f_s [GHz]	Q_o	Q_s	V_o [mm ³]	V_s [mm ³]	ϵ'_r	$tg \delta$
HD30	8.578791	8.576766	3916.1	3906.4	6295.664	27.45	1.03	~10 ⁻⁴
LD60	8.578791	8.574678	3916.1	3905.1	6295.664	23.88	1.06	~10 ⁻⁴

TABLA 9. MEDIDAS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL ZOTEFOAMS.

⁶ Son espumas de la marca Plastazote, de polietileno de baja densidad (LDPE, low density polyethylene) o de alta densidad (HDPE, high density polyethylene).

OTROS RESULTADOS.

COEFICIENTE DE EXPANSION TERMICA LINEAL DEL LATON

Con la medida de la frecuencia de resonancia de la cavidad vacía, a dos temperaturas diferentes, es posible estimar la contracción térmica lineal integrada en un rango de temperatura, utilizando la expresión (10). Las frecuencias medidas a 295.7 K en aire y a 17.6 K en vacío son 8.57767 GHz y 8.614138 GHz respectivamente, lo que se traduce en una contracción lineal integrada entre 295.7 y 17.6 K de 3.9 $\mu\text{m}/\text{mm}$.

CONDUCTIVIDAD DEL ORO

A través de la expresión clásica para la profundidad de penetración en el conductor (11) y la relación entre el factor de calidad del conductor y la profundidad de penetración en una guía rectangular resonante [5], es posible relacionar la conductividad con el factor de calidad. De esta forma es posible obtener la variación de la conductividad del oro cuando se enfría de temperatura ambiente a temperatura criogénica, según la expresión (12). El resultado de la medida es que la conductividad del oro a temperatura criogénica (20 K) es unas 5 veces mayor que a temperatura ambiente (300 K).

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma_c}} \quad Q_c = \frac{\mu f(a, b, l, p)}{\mu_o \delta_s} \quad [5] \quad (11)$$

$$\frac{Q_c}{Q_H} = \sqrt{\frac{f_{oC} \cdot \sigma_C}{f_{oH} \cdot \sigma_H}} \quad (12)$$

4. CONCLUSIONES FINALES.

Como advierten los métodos ASTM D 3380-90 [18] e IPC-TM-650 2.5.5.5 [19], “no debe asumirse que el valor de la constante dieléctrica y la tangente de pérdidas que se obtiene con ellos corresponden directamente con los valores reales. El valor de los métodos consiste en asegurar la consistencia del producto, esto es, la repetitividad de resultados en las tarjetas fabricadas”. En otras palabras, el valor medido de la constante dieléctrica y la tangente de pérdidas depende del método de medida utilizado, por lo que se debe ser cauto al comparar resultados obtenidos por distintos métodos.

El objetivo de estas medidas era cuantificar la variación que sufren la constante dieléctrica y la tangente de pérdidas del sustrato 6002 de Rogers y del Mylar cuando se reduce su temperatura de 300 a 20 K. El resultado obtenido con dos técnicas de medida, la de resonadores en stripline y la de perturbación de cavidad, es que la variación con la temperatura de la constante dieléctrica es despreciable tanto en el sustrato 6002 de Rogers como en el Mylar. La estimación de la tangente de pérdidas con el método de perturbación de cavidad es más precisa. Sin embargo este valor es difícil de estimar, en la literatura NIST [15] y Murthy [16] presentan distintos valores para la tangente de pérdidas del teflón, por lo que es mejor ser cautos con los resultados obtenidos. Hay que puntualizar que en las estimaciones a temperatura criogénica se comete un error por no poder corregir la contracción de los resonadores con la temperatura, menor del 2.5 % para la constante dieléctrica y del 5 % para la tangente de pérdidas.



Tras haber obtenido valores muy similares de la constante dieléctrica con las dos técnicas de medida, la de resonadores en stripline y la de perturbación de cavidad, y habiendo comprobado la técnica de perturbación de cavidad con un dieléctrico, CuFlon, medido ampliamente en la literatura y por tanto utilizado como referencia, es posible afirmar que la constante dieléctrica del sustrato 6002 de Rogers a temperatura ambiente y 8.5 GHz tiene un valor más próximo a 2.78 ± 0.04 que al valor 2.94 ± 0.04 especificado por el fabricante.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] I. Malo, J. D. Gallego, M. Diez, “Híbrido criogénico de 3dB 90° para la banda de 4-12 GHz”, *CAY-Informe Técnico OAN 2008-13*, Jun 2008.
- [2] I. Malo, J. D. Gallego, M. C. Diez, C. Cortés, C. Briso, “Cryogenic hybrid coupler for ultra low noise radio astronomy receiver,” *2009 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*
- [3] I. López-Fernández, J. D. Gallego, C. Diez, A. Barcia, J. M. Pintado, “Wide Band, Ultra Low Noise Cryogenic InP IF Amplifiers for the Herschel Mission Radiometers,” in *Proc. SPIE*, vol. 4855, 2003, pp. 489-500.
- [4] Agilent, “Basics of measuring the dielectric properties of materials”, Application Note.
- [5] J. M. Miranda, J. L. Sebastián, M. Sierra, J. Margineda, “Ingeniería de microondas: técnicas experimentales”. Prentice Hall, 2002. ISBN: 8420530999
- [6] R. G. Carter, “Accuracy of microwave cavity perturbation measurements”, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 49, no. 5, pp. 918-923, May 2001.
- [7] H. A. Bethe, J. Schwinger, “Perturbation theory for cavities”, *NDRC*, Rep. D1-117, 1943.
- [8] H. B. G. Casimir, “On the theory of electromagnetic waves in resonant cavities”, *Philips Research Rep.*, p. 162, 1951.
- [9] S. Chao, “Measurements of microwave conductivity and dielectric constant by the cavity perturbation method and their errors”, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 33, no. 6, Jun 1985.
- [10] E. G. Spencer, R. C. LeCraw, L. A. Ault, “Note on cavity perturbation theory”, *J. Appl. Phys.*, vol. 28, p. 130, 1957.
- [11] R. A. Waldron, “Perturbation theory of resonant cavities”, *Proc. Inst. Elec. Eng.*, Monograph no. 373E, pp. 272-274, Apr. 1960.
- [12] R. A. Waldron, “Theory of guided electromagnetic waves”, Van Nostrand Reinhold, London 1970, ch. VI, pp. 292-318.
- [13] R. E. Collin, “Field Theory of Guided Waves”, *IEEE Press Series on Electromagnetic Wave Theory*, Oxford University Press, NJ, 1996. ISBN: 0198592132.
- [14] B. N. Taylor, C. E. Kuyatt, “Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results”, *NIST technical note 1297*, 1994.
- [15] R. G. Geyer, J. Krupka, “Dielectric properties of materials at cryogenic temperatures and microwave frequencies”. *NIST, Conference of Precision Electromagnetic Measurements*, Boulder, CO 1994.
- [16] V. R. K. Murthy, R. Raman, “A method for the evaluation of microwave dielectric and magnetic parameters using rectangular cavity perturbation technique”, *Solid State Communications*, vol. 70, no. 8, pp. 847.850, 1989.
- [17] Klaus D. Timmerhaus, Thomas M. Flynn, “Cryogenic Process Engineering”. *The international cryogenics monograph series, Plenum Press* 1989. pp. 80-81.
- [18] ASTM Standard D 3380-90, “Standard Test Method for Relative Permittivity (Dielectric Constant) and Dissipation Factor of Polymer-Based Microwave Circuit Substrates”, 2003.
- [19] IPC-TM-650 Test Methods Manual no. 2.5.5.5, “Stripline Test for Permittivity and Loss Tangent (Dielectric Constant and Disipation Factor) at X-Band. IPC Association Connecting Electronics Industries, March 1998.