

Filtros de Microondas de una Sola Pieza Realizados Mediante Fundido Selectivo por Láser

J. A. Lorente Acosta, M. Martínez Mendoza, J. S. Gómez Díaz, M. García Viguera, A. Shahvarpour, A. Martínez Ros, M. Jiménez Nogales, R. Guzmán Quirós, A. Álvarez Melcón
 Grupo de Electromagnetismo Aplicado a las Telecomunicaciones (GEAT)
 Universidad Politécnica de Cartagena, Antiguo Cuartel de Antigones. Plaza del Hospital, N° 1, 30202 Cartagena (Murcia)
 E-mail: jose.lorente@upct.es, alejandro.alvarez@upct.es

Resumen. Este paper presenta filtros en guía de onda realizados mediante una innovativa técnica de fabricación conocida como "Selective Laser Melting" ó SLM. Se han fabricado dos tipos de filtros de quinto orden en guía de onda y con un ancho de banda de 0.9%. Ambos diseños tienen la misma respuesta en frecuencia pero diferentes geometrías internas. El segundo diseño hace uso de la libertad de geometría que ofrece esta nueva tecnología por lo que se han empleado técnicas de modelado de geometría para ayudar a reducir pérdidas. Gracias a la optimización de la geometría, es posible mejorar el factor de calidad en al menos un 15%.

1 Introducción

En aplicaciones espaciales, las pérdidas por disipación son críticas tanto para la recepción de la señal a muy bajas potencias así como para los filtros de alta potencia de salida. Además, en aplicaciones de alta potencia también es de gran importancia la intermodulación pasiva (PIM). Desde este punto de vista, filtros fabricados de una sola pieza son deseables ya que tienen el potencial de conseguir un Q óptimo y un diseño libre de PIM debido a la minimización de contactos entre superficies. Las técnicas de molde o las de *electroforming* actuales podrían ser empleadas para obtener piezas de una sola parte. Sin embargo, estas técnicas requerirían un coste mucho mayor o un tiempo de entrega largo, ofreciendo una libertad de geometría limitada [1].

Este no es el caso para una nueva clase emergente de técnicas de fabricación aditivas [2]. Una tecnología prometedora es *Direct Metal Laser Sintering* (DLMS). Dicha tecnología ha sido usada recientemente para la fabricación de un *Ortho Mode Transducer* (OMT) que es parte de un sistema de antenas en banda Ka [3].

En este trabajo, un total de seis filtros en guía de onda con acoplo directo hechos de AlSi10Mg y titanio (grado 2) han sido diseñados y fabricados utilizando SLM por primera vez, según conocimiento de los autores. Los filtros están clasificados en tres sets, tal y como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Sets de Filtros

| | Prototipo |
|--|-------------------|
| SET 1 (Aleación de Aluminium -AlSi10Mg-) | Base (Al 1) |
| | Optimizado (Al 2) |
| SET 2 (Titanio) | Base (Ti 1) |
| | Optimizado (Ti 2) |
| SET 3 (Titanio Pulido Químicamente) | Base (Ti 3) |
| | Optimizado (Ti 4) |

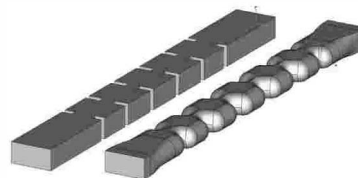


Fig. 1: a) Modelo CAD del filtro base y b) Modelo CAD del filtro de geometría optimizada.

Como diseño base se ha tomado un filtro en guía de onda de quinto orden con sección rectangular e iris inductivos también rectangulares (ver Fig. 1a). Para el segundo diseño se ha hecho uso de la libertad de geometría (ver Fig. 1b). El filtro fue diseñado con el mismo ancho de banda y el mismo orden que el diseño base, pero haciendo uso de geometrías optimizadas [4] con el fin de incrementar el Q efectivo de los filtros sin comprometer el comportamiento de las frecuencias espurias.

2 Tecnología SLM

SLM es una tecnología de fabricación aditiva en la que en lugar de eliminar material de un bloque, la pieza se construye capa a capa. Para la realización del proceso, el archivo CAD 3D se divide en capas sucesivas muy finas. Dichas capas se corresponden con las capas de polvo de metal que se añaden una encima de otra en la máquina SLM y que son fundidas por un láser antes de aplicar la siguiente capa de polvo de metal. Gracias a esta tecnología y siempre que el polvo no consolidado pueda ser eliminado a través de un orificio, no existe límite en la geometría del diseño. En tan sólo unas pocas horas es posible crear geometrías extremadamente complejas en lugar de los días o incluso semanas que se requieren si se hace uso de procesos tradicionales, aunque con la desventaja de que a mayor tasa de fabricación se obtiene una menor precisión en la

pieza final. Estas tecnologías han sido satisfactoriamente usadas en el campo médico y en implantes de ortodoncia, para la fabricación de partes de coches Fórmula 1, joyería o arte. Sin embargo, nunca antes habían sido utilizadas para la fabricación de filtros RF.

3 Descripción y Diseño de los Filtros

La geometría interna de los dos diseños se muestra en la Fig. 1. y sus especificaciones vienen dadas en la Tabla 2. Con el fin de minimizar las pérdidas de inserción sin que afecte al rendimiento espurio, se han investigado y se han propuesto cavidades e iris geoméricamente optimizados [4]. Mediante el uso de dichos elementos optimizados se ha previsto una mejora de al menos un 15% con respecto del diseño base.

4 Fabricación de Prototipos SLM y Medidas

Se han fabricado un total de seis filtros. La Fig. 2 muestra una foto del filtro fabricado en aleación de aluminio con una geometría interna optimizada tal y como se recibió del fabricante. La respuesta del filtro base en aluminio (Al1) tal y como se recibió está casi centrada a la frecuencia deseada, pero el nivel de pérdidas de retorno oscila entre 8-12dB. Por el contrario, la respuesta del filtro optimizado en aluminio (Al2) sin sintonizar posee un desvío mayor en la frecuencia central (aproximadamente 77 MHz), pero sin embargo se obtiene un valor de pérdidas de retorno mucho menor que en el caso del filtro base. Para los filtros optimizados en titanio (Ti2 y Ti4) se obtuvieron valores similares de al menos -13dB. Esta mejora de las pérdidas de retorno en los filtros optimizados podría deberse a la menor sensibilidad del filtro optimizado por su interfaz continua entre cavidades e iris.

Tabla 2: Especificaciones

| | |
|--------------------------|-----------|
| Orden | 5 |
| Pérdidas de Retorno | ≤ 25 dB |
| Ancho de Banda de Rizado | ≈ 100 MHz |
| Frecuencia Central | ≈ 11 GHz |

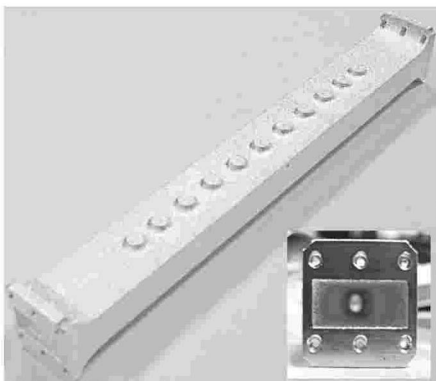


Fig. 2: Filtro de aleación de aluminio con geometría interna optimizada tal y como se recibió del fabricante.

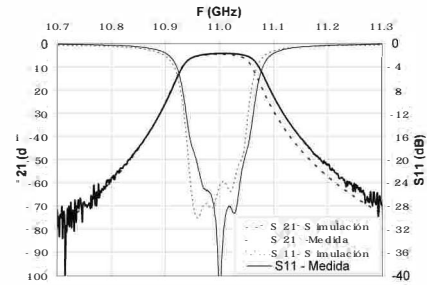


Fig. 3: Parámetros S del filtro base en titanio (Ti1) tras una mínima sintonización de los resonadores. Comparación entre resultados de medida y de simulación.

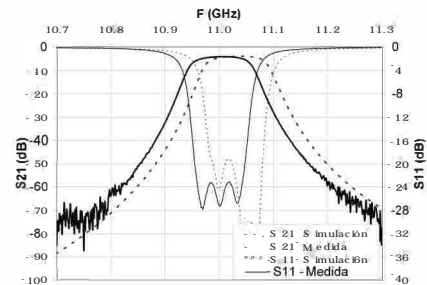


Fig. 4: Parámetros S del filtro optimizado en titanio (Ti2) tras una mínima sintonización de los resonadores. Comparación entre resultados de medida y de simulación.

En la Fig. 3 se muestra la respuesta medida del filtro base en titanio (Ti1) mientras que la del filtro optimizado en titanio (Ti2) se muestra en la Fig. 4, ambos tras ser sintonizados. Al igual que en estos casos, se obtuvieron pérdidas de retorno menores de -20 dB para el resto de filtros sintonizados (Al1, Ti3). Cabe destacar que sólo se sintonizaron las cavidades de los filtros. El objetivo consistía en obtener buenas pérdidas de retorno con un sintonizado mínimo para después extraer el Q efectivo de los filtros.

4.1 Extracción del Q Efectivo del Filtro

La Tabla 3 recoge el Q no cargado teórico así como la predicción y medida del Q efectivo del filtro. La incertidumbre de los valores de los filtros en aluminio y titanio se ha estimado de forma conservativa en menos de un 5%. Estas incertidumbres se producen en su mayor parte por la dificultad en ajustar de forma precisa la respuesta del filtro a un circuito equivalente. Las conductividades de los materiales usados en las simulaciones se recogen en la Tabla 4.

Se observa una gran similitud entre los factores Q medidos y simulados. Además, es interesante observar que los filtros optimizados (Al2, Ti2, Ti4) Fig. 1b mejoran el Q efectivo del filtro en al menos un 15% sobre los filtros base (Al1, Ti1, Ti3) Fig. 1a. Sin embargo, solo se obtiene entre un 40%-50% del Q no cargado teórico en el caso de los filtros no tratados, a diferencia del 50%-80% que se podría obtener usando procesos de fabricación tradicionales. Esto es debido a la alta rugosidad en la superficie que se obtiene mediante este proceso. Como referencia,

se incluyen las especificaciones del fabricante en la Tabla 5.

4.2 Medida de la Rugosidad

Como medida de verificación, se han llevado a cabo medidas de la rugosidad (ISO 4287) en los puertos de entrada y salida de los prototipos. Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 6.

De los datos se aprecia que la rugosidad medida es incluso peor de lo que se esperaba en las áreas en donde fue tomada la medida y, además, es interesante observar que la rugosidad obtenida por el proceso SLM es claramente un orden de magnitud mayor que la rugosidad medida en una transición de filtro fabricada a través de procesos tradicionales.

Tabla 3: Factor Q Medido

| | Teoría* | Sim.* | Sim.** | Medida | |
|--------------|-----------|-------|--------|----------|-------|
| | | | | No Sint. | Sint. |
| Al1 | 3995 | 3400 | 1740 | 1380 | 1400 |
| Al2 | 4633 | 4200 | 2150 | 1790 | - |
| Al2 Plateado | 9050 | 8200 | 4200 | 6300 | - |
| Ti1 | 1335 | 1155 | 590 | 560 | 580 |
| Ti2 | 1549 | 1435 | 730 | 680 | 700 |
| Ti3 | No Pulido | 1335 | 1155 | 590 | 570 |
| | Pulido | 1335 | 1155 | *** | 1070 |
| Ti4 | No Pulido | 1549 | 1435 | 730 | 720 |
| | Pulido | 1549 | 1435 | *** | 1320 |

*Sin Rugosidad **Rugosidad dada en Tabla 5 ***Rugosidad no conocida

Tabla 4: Conductividad de los Materiales

| Conductividad (S/m) | |
|---------------------|----------|
| AlSi10Mg | 16000000 |
| Titanio | 1785714 |
| Plata | 61000000 |

Tabla 5: Rugosidad*

| | Ra(μm) | Rz(μm) |
|----------|---------|---------|
| AlSi10Mg | 4 - 5.5 | 25 - 35 |
| Titanio | 5 - 6 | 30 - 40 |

*Inno-shape GMBH (www.inno-shape.de)

Tabla 6: Resultados de Medida de Rugosidad

| | Ra(μm) | Rz(μm) | Rs(μm) |
|-------------------|---------------------|----------------------|--------|
| Al1 | 14.86±4.85 (95% IC) | 87.58±27.79 (95% IC) | 19.46 |
| Ti1 | 8.10±0.30 (95% IC) | 53.35±4.01 (95% IC) | 11.83 |
| Ti2 | 9.13±1.28 (95% IC) | 60.31±9.69 (95% IC) | 12.45 |
| Flange Mecanizado | 0.24 | 2.13 | |

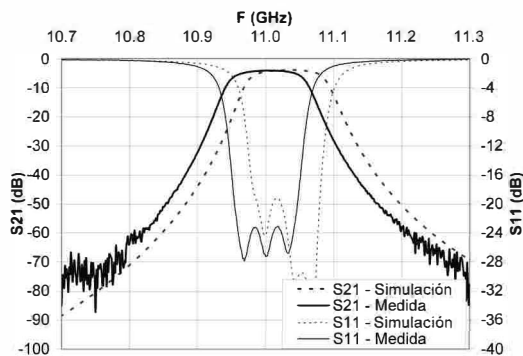


Fig. 5: Parámetros S del filtro optimizado en aluminio (Al2) tal y como se recibió y después de platear (sin sintonizar).

4.3 Extracción del Q Efectivo del Filtro con Superficie Tratada

Se llevaron a cabo dos experimentos sobre la superficie de los filtros. En el primer caso, se aplicó un pulido químico a uno de los filtros base y a su correspondiente optimizado (Ti3 y Ti4). Después del pulido se obtuvo al menos un 75% del Q no cargado teórico.

El segundo experimento consistió en platear el filtro optimizado en aluminio (Al2). La respuesta del filtro antes y después del proceso se muestra en la Fig. 5. En este caso se obtuvo alrededor del 70% del Q no cargado del filtro tras el plateado. Los resultados de ambos experimentos se recogen en la Tabla 3.

5 Conclusiones

En este paper se ha analizado un nuevo proceso de fabricación (SLM) que permite procesar materiales como aluminio y titanio para un nuevo propósito: la fabricación de filtros de microondas para aplicaciones RF. Se han diseñado dos filtros de banda estrecha de quinto orden: uno con cavidades e iris rectangulares y otro con geometría optimizada. Se han construido y medido un total de seis filtros, obteniéndose resultados excelentes en términos de Q efectivo y precisión de geometría. Se puede concluir que esta tecnología de fabricación aplicada a componentes RF es prometedora, ya que ofrece la posibilidad de fabricación de geometrías complejas en tan sólo una pieza.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido llevado a cabo bajo el contrato número 21508 de ESA-ESTEC con la Universidad Politécnica de Cartagena y ha sido parcialmente financiado por ésta última [R. 781/08].

Referencias

- [1] T. J. Ecclestone, P. Booth, and A. Dawkins, "Process Selection for Future Single-Feed-Per Beam Feed Chain Components," 29th ESA Antenna Workshop, 2007.
- [2] R. Crawford and J. Beaman, "Solid Freeform Fabrication," Spectrum, vol. 36, no. 2, pp. 34-43, Feb 1999.
- [3] J. Gilmore and P. Booth, "Manufacturing of RF Components using Direct Metal Laser Sintering," 30th ESA Antenna Workshop, 2008.
- [4] A. Zafra, "Advanced Geometries for Q Improvement in Waveguide Filter Design," Master's thesis, UPV in collaboration with ESA, 1996.