

Análisis de cavidades superconductoras para detección de axiones de materia oscura

José Gadea Rodríguez, Alejandro Díaz Morcillo, Juan Monzó Cabrera, Teresa Puig, Joffre Gutiérrez
jose.gadea@upct.es, alejandro.diaz@upct.es, juan.monzo@upct.es, teresa@icmab.es, jgutierrez@icmab.es

Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), 30202, Cartagena.

Departamento de Materiales superconductores y nanoestructuras de gran escala (SUMAN), Institut de Ciència de Materials de Barcelona (ICMAB-CSIC), 08193, Barcelona.

Abstract- In dark-matter searches, the quality factor of microwave cavities immersed in high magnetic fields plays an important role in axion detection. Similarly, the form factor and volume of cavities influence the performance of the haloscope. The use of High Temperature Superconductors (HTS) can greatly increase this quality factor but the gaps between superconductor strips may be prejudicial. In this study, we describe how superconductor cavity caps and gaps between HTS strips (both horizontal and vertical) affect the experiment performance. Additionally, we demonstrate that modifying the caps geometry in a HTS cavity improves the quality factor, but this improvement is compensated by the decrease in volume and form factor, decreasing the global figure of merit. Additionally, the existence of gaps between HTS strips may significantly reduce the quality factor. Upper bounds for these gaps are indicated.

I. INTRODUCCIÓN

En los experimentos de detección de axiones de materia oscura, una cavidad resonante vacía se encuentra inmersa en un campo magnetostático del orden de Teslas y a temperatura criogénica (entre 10 mK y 4 K), con el fin de detectar la débil señal producida por la conversión del axión en un fotón [1]. Éste, siempre que tenga una frecuencia igual a la del modo de operación resonante de la cavidad, lo excitará y generará una débil señal en el puerto de la cavidad que, adecuadamente tratada en un receptor heterodino, puede ser detectada.

El parámetro que mide la calidad de este tipo de experimento es la denominada tasa de escaneo ($\frac{df}{dt}$), es decir, la velocidad a la que el sistema de detección, denominado haloscopia es capaz de barrer un rango de frecuencias en la búsqueda del axión. Esta tasa de escaneo depende del factor de calidad de la cavidad Q_0 según la ecuación [2]:

$$\frac{df}{dt} \propto \left(\frac{\beta}{1+\beta} \right)^2 \frac{Q_0 Q_a^2 V^2 C^2}{Q_0 + (1+\beta)Q_a} = F_{oM} \quad (1)$$

donde V es el volumen de la cavidad, β es su acoplamiento con la línea de transmisión que extrae la señal, Q_a es el factor de calidad del axión, igual a 10^6 [3], λ es la relación entre el ruido agregado por la cadena de lectura (principalmente el primer amplificador) y el ruido de la cavidad, C es el factor de

forma de la cavidad, un parámetro que evalúa la alineación del campo magnetostático externo \vec{B}_0 , y el campo eléctrico \vec{E} del modo resonante, [4] mediante

$$C = \frac{|\int_V \vec{E} \cdot \vec{B}_0 dV|^2}{\int_V \|\vec{B}_0\|^2 dV \int_V \epsilon_0 \|\vec{E}\|^2 dV} \quad (2)$$

donde ϵ_0 es la permitividad eléctrica del vacío. Las barras simples indican magnitud de un número complejo y las barras dobles indican la norma de un vector definido en 3D.

En este estudio se asume el uso de un imán solenoide, por lo que el modo resonante que maximiza C en una cavidad cilíndrica es el TM_{010} y, por tanto, será el modo empleado para la detección del axión.

Con el fin de aumentar el factor de calidad y, en último término, la tasa de escaneo, este trabajo analiza cómo influye en Q_0 , C , y V tanto la modificación de la geometría de una cavidad cilíndrica como la forma en la que sus paredes internas se cubren de un material superconductor. En este sentido, se estudia el efecto de imperfecciones, en forma de huecos longitudinales tanto verticales como horizontales, en la aplicación de las cintas de este superconductor.

II. ANÁLISIS GEOMÉTRICO DE LA CAVIDAD

Los superconductores tipo I [5, 6] no pueden emplearse en condiciones de alto campo magnético. Por tanto, en esta aplicación se emplea un superconductor tipo II como el REBCO (Rare-Earth Barium Copper Oxide) que además es un superconductor de alta temperatura crítica ($T_c = 90 K$) [6]. Este material ha sido empleado por el grupo RADES en la búsqueda del axión en torno a los 9 GHz [7].

La aplicación del REBCO a una cavidad de microondas, generalmente compuesta de cobre, consiste en un proceso de adhesión utilizando cintas superconductoras fabricadas con la tecnología de recubrimiento “Coated Conductors” [8] a las paredes interiores de la cavidad [9], con el fin de reducir las pérdidas en ella. Este proceso de adhesión es necesario dada la imposibilidad de crecer estos materiales en superficies sin una textura muy determinada como es el cobre. Sin embargo,

este mismo proceso de adhesión es más sencillo y proporciona mejores resultados si se realiza sobre una superficie plana, de ahí que sea preferible emplear cavidades prismáticas poligonales a cavidades cilíndricas circulares.

La resistencia superficial del REBCO depende del ángulo de incidencia del campo magnetostático sobre la superficie, por ser un material anisotrópico, según [10, 11] en la configuración de máxima fuerza de Lorentz ($B \perp E$):

$$R_s(\theta) = R_s(0^\circ) \sqrt{(\cos \theta)^2 + (\sin \theta)^2 \cdot \gamma^{-2}} \quad (3)$$

donde θ es el ángulo entre el campo magnético externo y el vector normal de la superficie, γ^{-1} es el factor de anisotropía del REBCO [6, 9, 12, 13], y $R_s(0^\circ)$ es la resistencia superficial para un ángulo de 0° , es decir, incidencia perpendicular. Sin embargo, ésta no es exactamente la configuración que corresponde a la cavidad estudiada, donde una componente se halla en la configuración de Lorentz-free ($B//E$), situación que nunca ha sido evaluado experimental ni teóricamente. Ello implica que los valores de resistencia superficial asumidos se pueden considerar como un límite superior.

Dado que (3) indica que R_s aumenta conforme \vec{B}_0 es más perpendicular a la superficie, tiene sentido que la sustitución de las tapas planas inferior y superior de la cavidad por geometrías que puedan reducir ese ángulo de incidencia mejore el factor de calidad, pero es necesario que lo haga también con la tasa de escaneo. En esta sección se ha comparado el comportamiento de tres geometrías de tapas (planas, piramidales y semiesféricas de base poligonal) en una cavidad resonante cilíndrica poligonal mediante el software de simulación electromagnética CST Studio Suite 2023 [14] como se muestra en la figura 1. Todas estas geometrías han mantenido la misma longitud y diámetro con el fin de ocupar el mayor espacio disponible dentro del imán que genera el campo magnetostático externo.

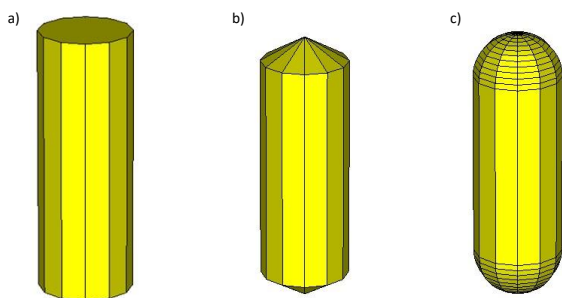


Fig. 1. Geometría de cavidades superconductoras cilíndricas poligonales de 12 lados. a) Tapas planas, b) Tapas piramidales, c) Tapas semiesféricas con base poligonal.

Otro dato empleado es $R_s(0^\circ) = 0,5 \text{ m}\Omega$, que se ha tomado para un campo magnético de 8 T, frecuencia de 8 GHz y temperatura de 20 K (ver figura 2), ya que no se disponía de valores de R_s para temperaturas más bajas como muestra la figura 2 y eran los únicos disponibles en frecuencia. Estas medidas se realizaron siguiendo el procedimiento descrito en la configuración de fuerza de Lorentz máxima, dado que no existen resultados publicados de la configuración Lorentz-free.

Los cambios de geometría en una cavidad resonante afectan significativamente a la frecuencia de resonancia (f), Q_0 , C y V . Como se ha comentado anteriormente, se pretende mantener el mayor volumen posible, estando este limitado por las dimensiones del imán utilizado. Por este motivo, en la comparativa, la altura entre el punto más alto de tapas y base (d_{max}), que es 107,7 mm y el diámetro ($2a$) de cada cavidad serán las mismas, donde a viene determinado por la ecuación (4). En este trabajo se ha elegido un valor de $a = 16,57 \text{ mm}$, con el fin de trabajar a una frecuencia cercana a 7 GHz para un modo TM_{010} .

$$f_{\text{TM}_{010}} = \frac{c \cdot p_{01}}{2\pi \cdot a} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 2,4048}{2\pi \cdot a} \quad (4)$$

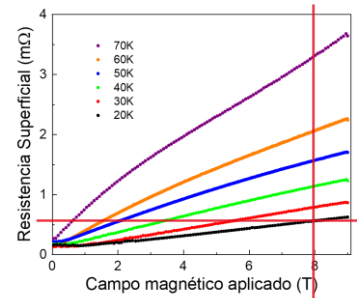


Fig. 2. Medida de la resistencia superficial del REBCO a 8 GHz vs. intensidad de campo magnético y temperatura en una configuración de máxima fuerza de Lorentz.

En la tabla 1 pueden observarse los principales parámetros obtenidos para las diferentes cavidades estudiadas y fijando $\lambda = 5$ y $\beta = 5$. Como cabía esperar, el mejor factor de calidad se obtiene para las tapas semiesféricas. No obstante, la reducción de volumen (medida en litros (L)) y una ligera reducción del factor de forma dan lugar a una disminución de la figura de mérito (FoM) del haloscopio.

Cavidad	Q_0 ($\times 10^6$)	C	$V(\text{L})$ ($\times 10^{-2}$)	$FoM(\text{L}^2)$ ($\times 10^7$)	$f(\text{GHz})$
Plana con REBCO	2,81	0,69	8,9	2,71	7,10
Piramidal REBCO	4,27	0,66	7,79	2,47	7,19
Semiesfér. REBCO	4,65	0,64	7,72	2,4	7,22
Plana Cobre	0,1	0,69	8,87	0,14	7,10
Piramidal Cobre	0,11	0,67	7,65	0,11	7,19
Semiesfér. Cobre	0,12	0,63	7,83	0,11	7,22

Tabla 1. Resultados de efectos de geometría y los materiales para las cavidades de la figura 1.

Cabe remarcar que este aumento del factor de calidad se ve lastrado por el menor peso del factor de calidad debido a las pérdidas de las paredes inferiores frente al peso del factor de calidad debido a las pérdidas en las tapas, limitando el efecto positivo de la variación de geometría en las tapas, como se puede observar en la tabla 2.

Cavidad	$Q_{olateral}$ ($\times 10^6$)	Q_{otapas} ($\times 10^6$)	Q_{ototal} ($\times 10^6$)
Plana REBCO	5,4	6,03	2,81
Piramidal REBCO	5,54	20,3	4,27
Semiesfér. REBCO	5,88	24,3	4,65

Tabla 2. Resultados de factor de calidad en laterales y tapas para cavidades de la figura 1 con REBCO.

Se ha realizado un estudio más extenso para el factor de mérito (FoM), teniendo en cuenta el efecto de acoplamiento entre línea coaxial y cavidad, modelado mediante el parámetro β . Los resultados para $\lambda = 5$ se muestran en la figura 3, donde también se presenta el comportamiento de las tres cavidades con las paredes sin recubrimiento de REBCO. Se puede comentar, por un lado, que las tapas planas obtienen el mejor valor de FoM para cualquier acoplamiento. Por otro lado, se puede apreciar la mejora significativa en la figura de mérito (10 veces mayor) que implica la aplicación del REBCO comparada con las paredes de cobre. Para las simulaciones se tomó la conductividad eléctrica del cobre puro a temperatura criogénica, siendo esta $\sigma = 2 \cdot 10^9$ S/m.

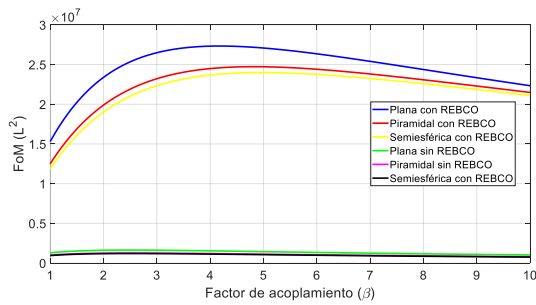


Fig. 3. Figura de mérito para las cavidades de la figura 1 con REBCO y sin REBCO en función del factor de acoplamiento para $\lambda = 5$. Calculada mediante simulaciones para una frecuencia de 7 GHz.

III. EFECTOS DE LOS HUECOS ENTRE TIRAS DE REBCO

La aplicación de las tiras de REBCO sobre las paredes de cobre es un proceso mecánico y químico complejo que puede producir errores de alineamiento y separación entre tiras, dejando un hueco de estaño entre ellas. Estas imperfecciones afectarán al factor de calidad, sobre todo, si las corrientes superficiales las atraviesan. Por esta razón, se presenta un análisis de este efecto con el objetivo de encontrar un límite superior aceptable en el tamaño de estos huecos. En esta ocasión, con el propósito de encontrar un valor de resistencia superficial más realista a 4 K, se analizó una variante de la cavidad de tapas planas presentada en [9], donde se realiza una curvatura para mantener en una única pieza la parte lateral y los extremos de la cavidad (ver figura 4), es decir, se eliminan las tapas, y por tanto las discontinuidades eléctricas entre tapas y cilindro.

Como se puede observar en la figura 4, la sección de la cavidad es un polígono regular de 12 lados, similar al

presentado en [9]. Se simuló esta cavidad mediante un barrido de valores de resistencia superficial hasta obtener el factor de calidad medido en [9] para el modo TM_{010} a temperatura criogénica, esto es, $Q_0 = 4,5 \cdot 10^6$. Esta resistencia superficial resultó ser $0,335$ m Ω y es el valor empleado como $R_s(0^\circ)$ en el estudio que se presenta a continuación.

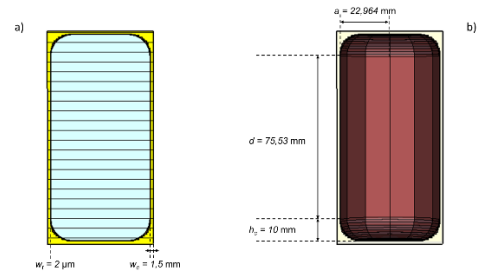


Fig. 4. Cavidad CAPP [8] con tiras de REBCO. a) Perspectiva de corte, b) Perspectiva interior incluyendo las tiras de REBCO.

Este estudio consistió en un análisis de la influencia de huecos tanto horizontales como verticales sobre el factor de calidad (Q_0). Para todos los casos, se simuló la cavidad con dimensiones idénticas a las indicadas en la figura 4 pero con tapas planas y manteniendo la altura máxima, y se modelaron los huecos suponiendo que entre ellos había estaño, cuya conductividad es $\sigma = 8,7 \cdot 10^6$ S/m. Esta cavidad con huecos y sin huecos se muestra en la figura 5.

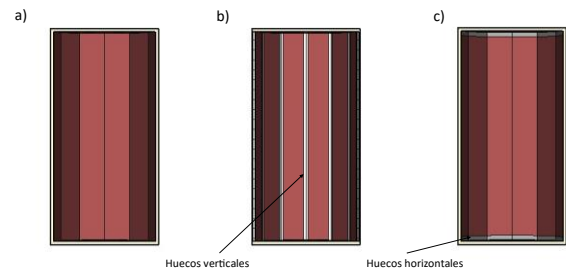


Fig. 5. Cavidad de la figura 4 con tapas planas. a) Sin huecos, b) Con huecos verticales, c) Con huecos horizontales.

La figura 6 muestra la influencia de los huecos verticales (figura 5b) en el factor de calidad de la cavidad (Q_0). Para ello, se simularon distintos espesores de huecos verticales entre tiras de en la cavidad. Se puede apreciar una caída significativa en Q_0 al aumentar el espesor de los huecos verticales teniendo un Q_0 aceptable para espesores de huecos verticales menores de $0,05$ mm o 50 μ m.

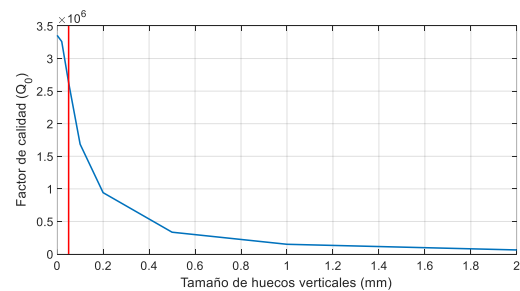


Fig. 6. Factor de calidad con respecto al grosor de huecos verticales.

El siguiente tipo de huecos analizados fueron los horizontales. Dado que las tiras de REBCO permiten cubrir de manera continua en dirección vertical las paredes, solo se producirán estos huecos en las zonas de unión con las tapas, pudiendo observarse este caso en la figura 5c. En la figura 7 se muestra la evolución de Q_0 frente al tamaño de estos huecos horizontales. Se observa que Q_0 tiene un comportamiento similar al de la cavidad con huecos verticales. De nuevo, se puede fijar el umbral de 0,05 mm de grosor de huecos con el fin de tener un Q_0 aceptable.

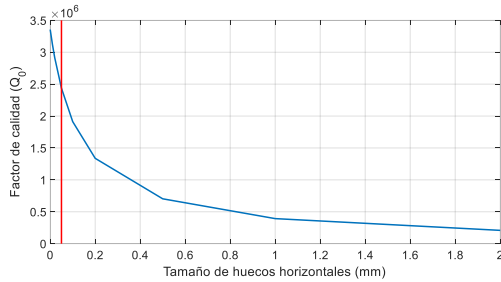


Fig. 7. Factor de calidad con respecto al grosor de huecos horizontales.

Por último, se ha analizado la combinación de huecos horizontales y verticales en la cavidad para comprender su efecto conjunto, ya que ambos pueden coexistir al aplicar tiras de REBCO. La figura 8 muestra la evolución de Q_0 para variaciones de ambos tipos de separaciones en las tiras de este material. Debido a los cortes de corriente superficiales que producen los huecos horizontales, observamos mayor influencia en este tipo de huecos siempre que los huecos verticales tengan un espesor como mucho igual a 0,02 mm. Para espesores mayores a este valor, los huecos verticales muestran una mayor influencia en el valor final de Q_0 .

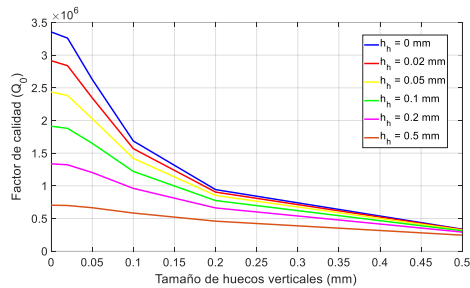


Fig. 8. Factor de calidad de cavidad de la figura 5a) con huecos verticales y horizontales; h_h indica grosor de huecos horizontales.

IV. CONCLUSIONES

En este estudio se ha demostrado que las tapas planas en cavidades prismáticas poligonales superconductoras ofrecen una mejor figura de mérito para experimentos de detección de axiones de materia oscura que las tapas piramidales y semiesféricas, aunque éstas mejoren el factor de calidad. Esto se debe a la reducción de volumen fundamentalmente y, en menor medida, a la disminución del factor de forma en estas modificaciones de las tapas. Debe tenerse en cuenta que estos dos parámetros tienen mayor influencia en (1) que el factor de calidad por su dependencia cuadrática. También se ha mostrado que los espacios entre tiras de REBCO deben evitarse en la medida de lo posible. Las simulaciones realizadas indican que el espacio entre tiras de material

superconductor debería ser inferior a 50 μm con el fin de mantener una Q_0 alta. Superado dicho umbral, el factor de calidad final de la cavidad de microondas sería degradado en exceso.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado dentro del grupo RADES, a cuyos miembros agradecemos su apoyo. Además, es parte del proyecto de I+D+i PID2022-137268NBC53, financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033/ y FEDER, UE. También se agradece la financiación de los proyectos PID2021-127297OB-C21 and CEX2019-422 000917-S, FCC-GOV-CC-0208 (KE4947/ATS) and PRTR-C1711 financiado con fondos MICIIN-NGEU-Generalitat de Catalunya. Asimismo, se agradece la colaboración con la empresa Fujikura (JP) que proporcionó la cinta superconductor en la que se realizaron las medidas experimentales.

REFERENCIAS

- [1] P.W. Graham, I. G. Irastorza, S. K. Lamoreaux, A. Lindner and K. A. Van Bibber, Experimental searches for the axion and axion-like particles, <https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-102014-022120>.
- [2] Kim, Dongok and Jeong, Junu and Youn, SungWoo and Kim, Youngeun and Semertzidis, Yannis K., "Revisiting the detection rate for axion haloscopes", JCAP 03, 066, 2020, arXiv2001.05605hep-ex, DOI 10.1088/1475-7516/2020/03/066.
- [3] Turner MS. Periodic signatures for the detection of cosmic axions. Phys Rev D Part Fields. 1990 Nov 15;42(10):3572-3575. doi: 10.1103/physrevd.42.3572. PMID: 10012760.
- [4] Díaz-Morcillo A, García Barceló JM, Lozano Guerrero AJ, Navarro P, Gimeno B, Arguedas Cuendis S, Álvarez Melcón A, Cogollos C, Calatroni S, Döbrich B, et al. Design of New Resonant Haloscopes in the Search for the Dark Matter Axion: A Review of the First Steps in the RADES Collaboration. Universe. 2022; 8(1):5. <https://doi.org/10.3390/universe8010005>.
- [5] Posen, S., Checchin, M., Melnychuk, O., Ring, T., Gonin, I., & Khabiboulline, T. (2023, September 5). High-Quality-Factor Superconducting Cavities in Tesla-Scale Magnetic Fields for Dark-Matter Searches. Physical Review Applied, 20(3). <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.20.034004>.
- [6] Romanov. A. (2022, April 19). Superconducting REBCO Coated Conductors for Proton Beam Screens in High-Field Particle Accelerators. Superconducting Materials and large scale nanostructures Department (SUMAN), Institut de Ciència de Materials de Barcelona (ICMAB-CSIC).
- [7] J. Golm et al., "Thin Film (High Temperature) Superconducting Radiofrequency Cavities for the Search of Axion Dark Matter," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 32, no. 4, pp. 1-5, June 2022, Art no. 1500605, doi: 10.1109/TASC.2022.3147741.
- [8] Obradors, Xavier & Puig, Teresa. (2014). Coated conductors for power applications: Materials challenges. Superconductor Science and Technology. 27. 044003. 10.1088/0953-2048/27/4/044003.
- [9] Ahn, D., Kwon, O., Chung, W., Jang, W., Lee, D., Lee, J., Youn, S.W., Youm, D., & Semertzidis, Y.K. (2019). Maintaining high Q-factor of superconducting YBa2Cu3O7- δ microwave cavity in a high magnetic field. <https://arxiv.org/abs/1904.05111>.
- [10] Blatter G, Geshkenbein VB, Larkin AI. From isotropic to anisotropic superconductors: A scaling approach. Phys Rev Lett. 1992 Feb 10;68(6):875-878. doi: 10.1103/PhysRevLett.68.875.
- [11] Pompeo N, Torokhtii K and Silva E 2017 Measurement 98 414–420.
- [12] Gutiérrez, J., Lordés, A., Gázquez, J. et al. Strong isotropic flux pinning in solution-derived YBa2Cu3O7-x nanocomposite superconductor films. Nature Mater 6, 367–373 (2007). <https://doi.org/10.1038/nmat1893>.
- [13] Romanov, A., Krković, P., Telles, G. et al. High frequency response of thick REBCO coated conductors in the framework of the FCC study. Sci Rep 10, 12325 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69004-z>.
- [14] Simulia. Software de simulación y análisis de EM 3D CST Studio Suite. <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/simulia/productos/cst-studio-suite/>.