

# Miniaturización y caracterización de un magnetómetro de disparo por flujo con núcleo superconductor de alta $T_c$

A. SÁENZ, N. CLARK

*Escuela de Física, Universidad de Costa Rica  
San José, Costa Rica*

H. NICULESCU, P.J. GIELISSE

*FAMU/FSU College of Engineering  
Tallahassee, FL 32316-2175, U.S.A.*

Y

W.G. MOULTON

*Department of Physics and Center for Materials Research and Technology  
411 Keen Building, Florida State University, Tallahassee, Florida 32306, U.S.A.*

Recibido el 28 de mayo de 1993; aceptado el 28 de octubre de 1993

RESUMEN. Se describe un magnetómetro capaz de medir directamente campos magnéticos en el orden de los nanoteslas. El elemento sensor consiste en un superconductor cerámico de pocos milímetros de altura y diámetro. Se basa en la fuerte respuesta magnética no lineal del superconductor a campos magnéticos alternos y en la dependencia lineal a campos dc superpuestos a los ac. El presente trabajo reporta una reducción volumétrica de unas 50 veces, manteniendo una sensibilidad mejor que 3 nanoteslas.

ABSTRACT. A type of magnetometer capable of measuring in the nanoteslas range is described. The sensing unit consists of a cylindrical ceramic superconductor a few millimeters in diameter and height. Its operation is based on the nonlinear strong magnetic response to ac magnetic fields and the linear response to dc fields superimposed on the ac. An important volume reduction in the order of 50 was accomplished while keeping the sensitivity better than 3 nanoteslas.

PACS: 06.30.Lz; 74.60.-w

## 1. INTRODUCCIÓN

Recientemente varios laboratorios [1,2] han trabajado en magnetómetros que incorporan sensores de cerámicas superconductoras, entre ellos el de dos de los autores del presente trabajo. Estos magnetómetros no sólo son sensibles a cambios de flujo, como los SQUIDS, sino que también pueden detectar densidades de flujo magnético. Además presentan varias ventajas operacionales y de costo, como es la de que funcionen a temperaturas de nitrógeno líquido y no de helio. Su operación se basa en la fuerte respuesta del superconductor a los campos magnéticos. Hemos medido campos de baja frecuencia con baja amplitud y aun campos directos superpuestos a campos alternos de alta frecuencia y gran amplitud.

Gallop *et al.* [1] utilizaron el hecho de que aunque los armónicos impares son función par del campo aplicado,  $H_a$ , los armónicos pares son función impar, lo que permite medir  $H_a$  como una respuesta lineal en el régimen de campos débiles. Esto se logra, dicen ellos, para frecuencias mayores de 100 kHz, a las que cesa la dependencia lineal de  $dV/dH$  en la frecuencia. Ellos desarrollaron un magnetómetro de la siguiente manera: Se establece un campo por medio de una bobina magnetizante a 100 kHz (drive) midiendo sincrónicamente en otra bobina (sensora), lo que permite obtener la curva de histéresis. Por simplicidad y máxima linealidad se usa la segunda armónica que se detecta con un amplificador *lock-in*.

Se ha reducido el volumen del superconductor unas 50 veces del volumen usado por Gielisse *et al.* [2], usándolo para medir campos del orden de 200 nT, y por primera vez se midieron campos constantes con esta clase de magnetómetro. Como es sabido, la segunda armónica es proporcional al volumen de la muestra, es por ello que la reducción en el volumen de la pastilla superconductora tiene marcada influencia en la sensibilidad final que se logra en este tipo de magnetómetro.

La magnetización ac en superconductores ha sido estudiada extensamente. Bean [4] explicó la generación de armónicas impares en los superconductores convencionales, sin embargo, las mediciones efectuadas en superconductores cerámicos en campos de presentan armónicos pares, lo que explican Ji *et al.* [5] modificando el modelo de Bean, al considerar la dependencia de la corriente crítica en el campo magnético, con lo que demostraron que cualquier dependencia de esta clase conduce a la generación de armónicos tanto pares como impares. Para un superconductor dentro de un campo sinusoidal puro producido por la bobina magnetizante ( $H = H_{ac} \sin \omega t$ ), se generan armónicos impares. Cuando se superpone un campo dc, además aparecen los armónicos pares. La señal de los armónicos es proporcional a  $H_{ac}^3/H^*$  para amplitudes del campo menores que  $H^*$ , un campo mínimo dependiente del tamaño, tal que penetra toda la muestra [1]; en nuestro caso es tal que la penetración es igual al radio del cilindro.

Para campos magnéticos menores al campo crítico  $H_{c1}$ , los superconductores tipo II, entre ellos los cerámicos, exhiben diamagnetismo perfecto, pero a campos mayores hay vórtices que penetran el cerámico por la región intergranular y en su anclaje (*pinning*) lo que explica la magnetización no lineal o histéresis [6]. Se estima que para campos ac las líneas de flujo entran y salen de la muestra con cierto atraso respecto al campo productor en forma no lineal [6].

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El sensor magnético consiste de un elemento superconductor, así como de bobinas magnetizante y sensora. El elemento superconductor consiste de un cilindro de YBaCuO de 5 mm de diámetro y 9 mm de largo con densidad en el orden de 4 g/cc, lo que produce granos con la región intergranular constituida por un superconductor débil (es decir, con el primer campo crítico  $H_{c1}$  y la corriente crítica  $J_c$  menores que en los granos). Esto permite la presencia de una red de fluxoides en el material intergranular de la muestra. A campos mayores éstos penetran los granos.

Estos cilindros se produjeron a partir de polvos adquiridos comercialmente (Grace Co.), los que se hacen pasar por un tamiz y se utilizan las partículas más gruesas, con tamaños

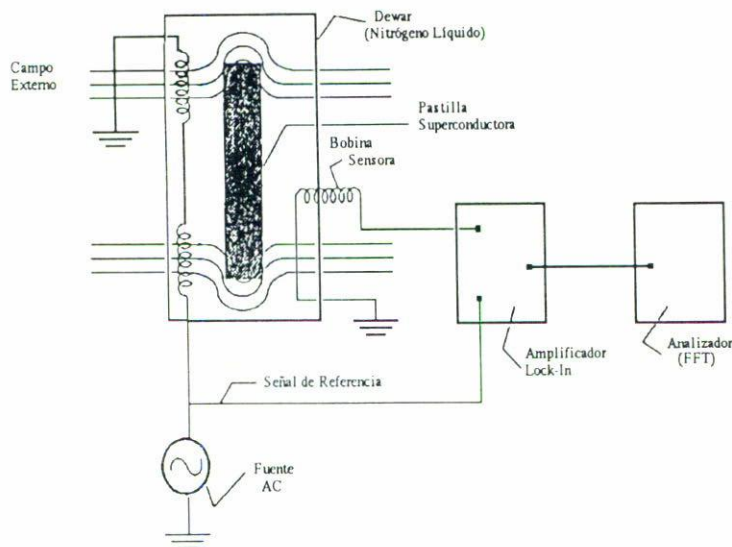


FIGURA 1. Diseño experimental.

mayores a las 35 micras, que luego son prensados hasta obtener el tamaño y densidad deseados. Posteriormente fueron sinterizados durante 12 horas a 950 °C y recocidos durante 5 horas más siguiendo el procedimiento habitual en flujo de oxígeno a 500 °C. Se midió la  $T_c$  por muestreo siendo ésta de 92 K. Alrededor de dichos cilindros se arrolla con alambre número 40 (de 80 micrones) la bobina sensora, de varios centenares de vueltas (470 la usada para la Fig. 5), y sobre ella se arrolla la bobina magnetizante con número de vueltas de orden de 350 en estos magnetómetros, del mismo alambre de cobre aislado y con cada mitad enrollada en sentido opuesto a fin de que el voltaje generado por ella en la sensora sea mínimo, es decir, que el flujo magnético total es cero en la bobina detectora cuando la señal es cero (Fig. 1).

Se produce un campo ac con frecuencia en el ámbito de los 50 kHz a las unidades de MHz mediante la bobina magnetizante. Se produce el campo a detectar, un campo dc coaxial con el superconductor, mediante unas bobinas de Helmholtz que rodean al dewar con nitrógeno líquido que contiene al magnetómetro.

Los componentes de la señal en su segunda armónica de la frecuencia aplicada a la bobina magnetizante se miden con un amplificador *lock-in* que compara la señal con una de 1 V, así lo que indica como dB son dBV, definidos de la siguiente manera: el número de dBV es igual a 20 veces el logaritmo de la señal en voltios sobre 1 voltio. Después de poner el cero eliminando el desbalance y las señales de fondo, se mide una salida proporcional a la intensidad del campo aplicado. Al detectar campos periódicos de baja frecuencia ( $\sim 1$  Hz), también llamados pseudo- directos, producidos con bobinas de Helmholtz, la salida del amplificador *lock-in* se procesa con la transformada rápida de Fourier (FFT) mediante un analizador de espectros, Fig. 1.

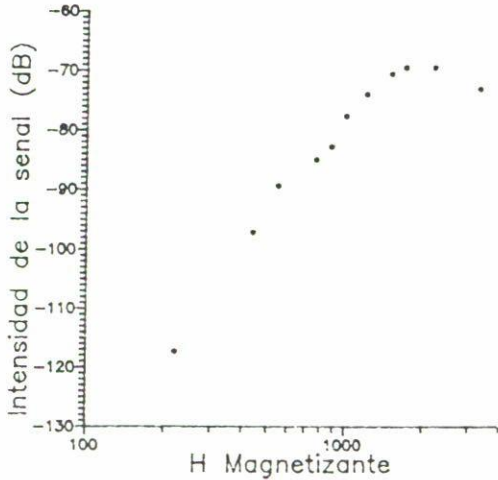


FIGURA 2. Dependencia de la intensidad de la señal en la amplitud del campo magnetizante (en unidades arbitrarias), al someter la bobina magnetizante a 1 Vpp a 50 kHz en un campo aplicado de 20 mOe.

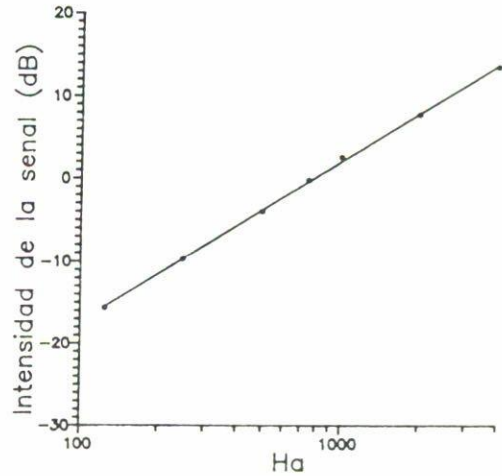


FIGURA 3. Dependencia lineal de la intensidad de la señal en el campo externo (pseudodc) al aplicar 1 Vpp a 50 khz a la bobina magnetizante.

3. RESULTADOS

En este estudio la magnitud del campo aplicado es menor que  $H^*$ . El voltaje total dependiente del tiempo  $V(t)$  generado en la bobina sensora que rodea al superconductor es proporcional a la razón de cambio de la magnetización, al área eficaz  $A$  y a  $N$  el número de vueltas de la bobina sensora. En este trabajo se estudia la dependencia con  $H_a$ , la magnitud del campo a medir y con  $H_{ac}$ , el campo producido por la bobina magnetizante. Se espera [2] que la magnitud de la señal armónica sea proporcional a la frecuencia  $\omega$  y a  $H_{ac}^3/H^*$  si  $H_{ac} < H^*$ . Así [2]

$$V_2 \propto \omega ANH_a \frac{H_{ac}^3}{H^*} \tag{3.1}$$

Se ha medido la intensidad de la segunda armónica (Fig. 2), encontrando que varía 60 dB por década lo que implica exponente 3 para  $H_{ac}$ . Otras mediciones brindaron exponentes entre 2.8 y 3, lo que confirma la dependencia cúbica esperada de la Ec. (1) y deseada para medir campos magnéticos débiles con este magnetrómetro. También se halló una dependencia lineal de la señal de la segunda armónica en el campo dc a medir; en la Fig. 3 apreciamos 20 dB por década, es decir, exponente 1 para  $H_a$  en concordancia con la ecuación 1. El límite inferior lo impone el ruido.

La Fig. 4 muestra la dependencia de la señal con la frecuencia del campo magnetizante para varias corrientes por la bobina, lo que es proporcional a la amplitud del campo magnetizante. Se observa una respuesta lineal hasta unos 600 kHz, de acuerdo con lo reportado por Gielisse *et al.* [2]. A estas frecuencias la linealidad es opacada por resonancias en las

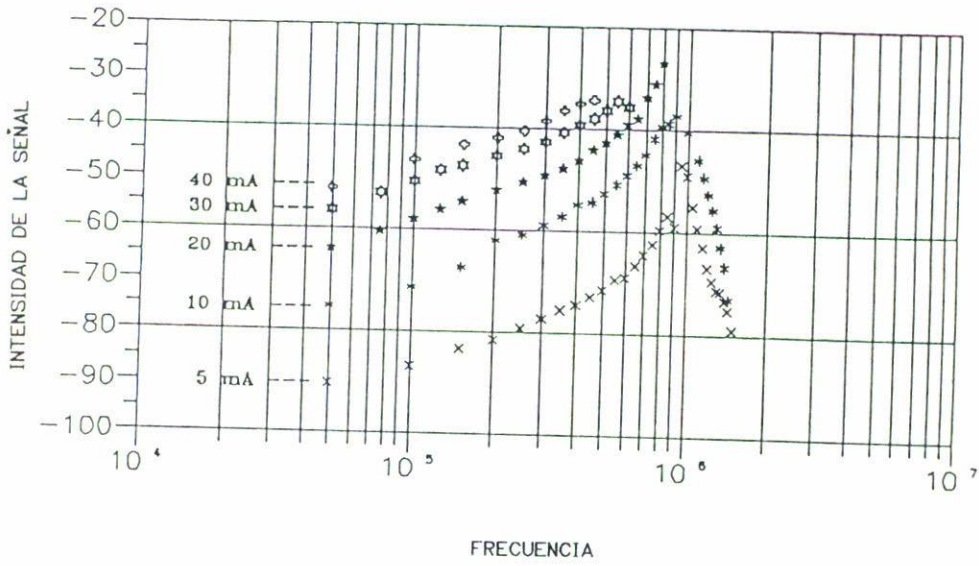


FIGURA 4. Dependencia de la intensidad de la señal en la frecuencia. Las corrientes indicadas corresponden a la que circula por la bobina magnetizante.

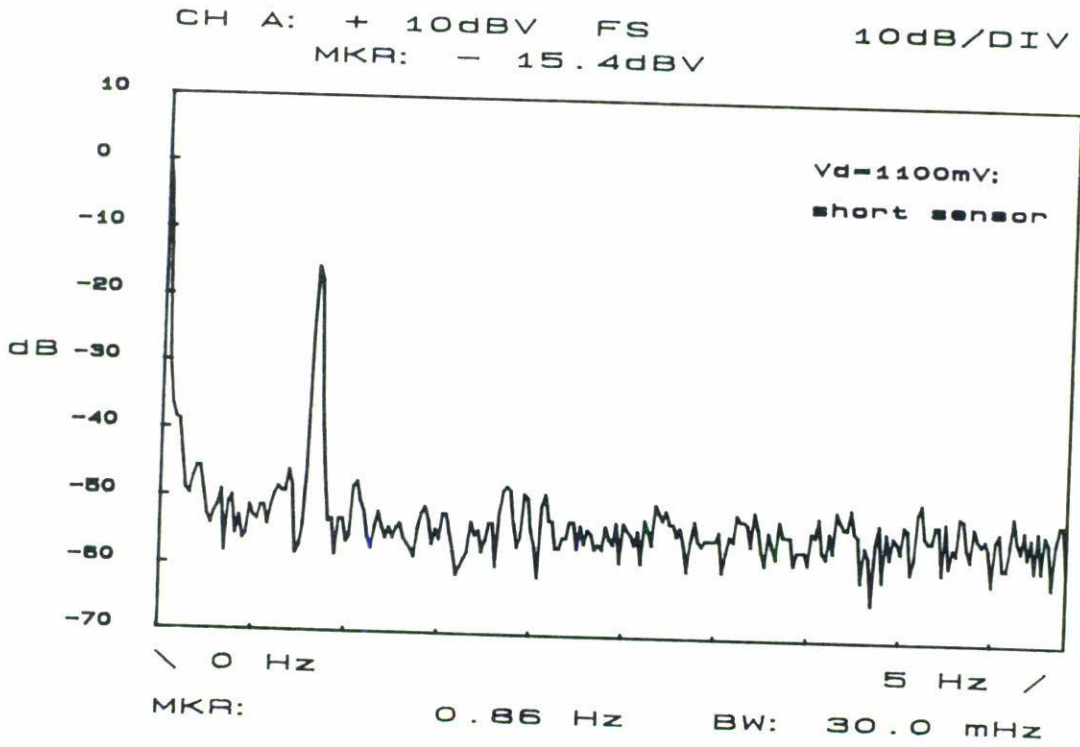


FIGURA 5. Intensidad de la señal en una medición típica producida por un campo de 200 nT a 1 Hz.

bobinas, por lo que se puede aumentar la región lineal empleando bobinas con menor número de vueltas o con alambre de diferente diámetro.

En la Fig. 5 se observan los resultados de una medición típica con un campo externo de muy baja frecuencia, esto permite usar el analizador de espectros y mejorar la sensibilidad. Nótese que el nivel de ruido es de  $-53$  dBV y el del pico de la señal de 200 nT es  $-16$  dBV, la señal está unos 39 dBV sobre el nivel de ruido, lo que significa que la sensibilidad es de menos de 3 nT. Con datos obtenidos de esta forma se construye la Fig. 3, eliminándose así los voltajes espurios.

#### 4. CONCLUSIONES

De lo anteriormente expuesto podemos concluir que se cuenta con un magnetómetro capaz de medir directamente campos en el ámbito de los nanoTeslas. Además, las dimensiones tan pequeñas del sensor lo hacen adecuado para explorar dominios milimétricos.

Es particularmente importante el haber reducido unas 50 veces el volumen de la pastilla superconductora y lograr sensibilidad en el orden de los nanoTeslas, ya que la intensidad de la segunda armónica —empleada con el *lock-in*— es proporcional al volumen de la muestra. La detección de campos de frecuencia muy bajas brinda el beneficio de mayor sensibilidad mediante el empleo de la transformada rápida de Fourier.

#### REFERENCIAS

1. J.C. Gallop, S. Lilleyman, C.D. Langham, W.J. Radcliffe, M. Steward, *IEEE Trans Man.* **25** (1989) 897.
2. P.J. Gielisse, H. Niculescu, B.Roy, K.W. Jones, G. Larkin, Z. Hu, *Supercond. Sci. Tech.* **4** (1991) 416.
3. P.J. Gielisse, H. Niculescu, B. Roy, P.B. Pernambuco-Wise, J.E. Crow, S. Sykora, R. Wahlers, *Superconducting Devices and their Applications*, H. Koch, H. Lubbig (Eds.) (1992) 196.
4. C.P. Bean, *Rev. Mod. Phys.* **36** (1964) 31.
5. L. Ji, R.H. Sohn, G.C. Spalding, C.J. Lobb, M. Tinkham, *Phys. Rev.* **B40** (1987) 10936.
6. K.H. Muller, J.C. Macfarlane, R. Driver, *Physica C* **158** (1989) 366.