

Medición de la susceptibilidad de un superconductor de alta temperatura crítica

Araceli Billodas, Christian Helman, Aureliano Tartaglione

Se busca medir la susceptibilidad de una muestra superconductor tipo II con un par de bobinas y un Lock-in. Se observó la transición de fase a su estado superconductor

Introducción

Los superconductores constituyen un tipo de material que tienen una transición de fase al estado superconductor a bajas temperaturas. Presentan 2 propiedades únicas que aparecen al ocurrir dicha transición. Tienen esencialmente conductividad infinita y excluyen por completo el flujo magnético. Estas propiedades son independientes en el sentido de que ninguna no implica la otra¹

La transición depende tanto del campo magnético como de la temperatura y el material se transforma de nuevo al estado normal en presencia de campos mayores que el campo crítico H_c . Idealmente:

$$H_c = H_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (1)$$

El comportamiento eléctrico y magnético macroscópico en el estado superconductor es descrito de una manera sencilla por las ecuaciones constitutivas $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ (donde E es el campo eléctrico) y $\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$ (con M la magnetización de la muestra y H el campo aplicado) para valores extremos de los parámetros del material

$$\sigma = 0 \quad ; \quad \chi = -1 \quad (\mu = 0)$$

que representan una conductividad y un diamagnetismo perfectos. Este último requiere que la densidad de flujo \mathbf{B} y la densidad de corriente \mathbf{J} sean cero en el interior del superconductor y que cualquier corriente superconductor sea una corriente superficial.

La susceptibilidad magnética es una medida de la magnetización de la muestra y se define como

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (2)$$

Donde H es el campo magnético dc aplicado. Similarmente mediciones de susceptibilidad ac involucran la aplicación de un campo magnético variable H_{ac} a una muestra. Para esto se utiliza un sistema de bobinas que registran la respuesta de la muestra. Así se tiene que

$$\chi = \frac{dM}{dH_{ac}} \quad (3)$$

Marco teórico

El principio de medición de susceptibilidad ac involucra exponer la muestra a un pequeño campo magnético alternante. La variación de flujo debido a la muestra es detectada por un sistema de bobinas que la rodea, midiendo el voltaje resultante inducido. Este voltaje es proporcional a la derivada temporal de la magnetización de la muestra. Usando el concepto de inductancia mutua se puede derivar una expresión para χ en términos de cantidades directamente mensurables².

En nuestro susceptómetro, dos bobinas idénticas se sitúan simétricamente dentro de la bobina primaria utilizándose como secundario en el circuito de medición. Ver figura 1. Las dos bobinas se conectan en oposición para cancelar los voltajes inducidos por el campo ac o voltajes inducidos por fuentes externas (ruidos). La muestra es posicionada en una de las bobinas. El voltaje inducido en las bobinas es la variación temporal del flujo del campo magnético

$$v(t) = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{mks}) \quad (4)$$

Si $M(t)$ es la inducción magnética dentro de la muestra promediada sobre su volumen, el flujo magnético a través de las N vueltas de radio a del secundario es

$$\Phi = \mu_0 \pi a^2 M(t) \quad (5)$$

Entonces, el voltaje medido es

$$v(t) = -\mu_0 \pi a^2 N \frac{dM(t)}{dt} \quad (6)$$

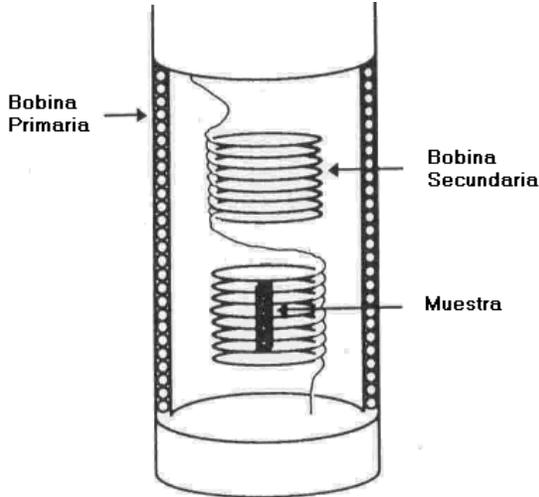


Figura 1. Sistema de bobinas

Para un campo ac pequeño la respuesta de la muestra será en general no lineal. Esto resulta en una onda periódica distorsionada que puede ser descrita por una expansión de Fourier. Para una susceptibilidad magnética compleja χ'_n y χ''_n (partes real e imaginaria respectivamente) se tiene:

$$M(t) = \sum_{n=1}^{\infty} H_{a0} (\chi'_n \cos(n\omega t) + \chi''_n \sin(n\omega t)) \quad (7)$$

donde H_{a0} es el campo magnético aplicado. Reemplazando la ecuación (7) en (6) se obtiene:

$$v(t) = v_0 \sum_{n=1}^{\infty} n (\chi'_n \sin(n\omega t) - \chi''_n \cos(n\omega t)) \quad (8)$$

donde $v_0 = \mu_0 \pi a^2 \omega N H_{a0}$.

Un amplificador Lock-in se utiliza para medir el fundamental v_1 :

$$v_1(t) = v_0 (\chi'_1 \sin(\omega t) - \chi''_1 \cos(\omega t)) \quad (9)$$

Diseño del aparato

El diseño del aparato se divide en 2 partes. La primera consiste en un sistema de bobinas como

el ya mencionado, que son las encargadas de medir la variación de flujo magnético debido al cambio de fase del superconductor, ver figura 1. La segunda parte consta del diseño del dispositivo de enfriamiento.

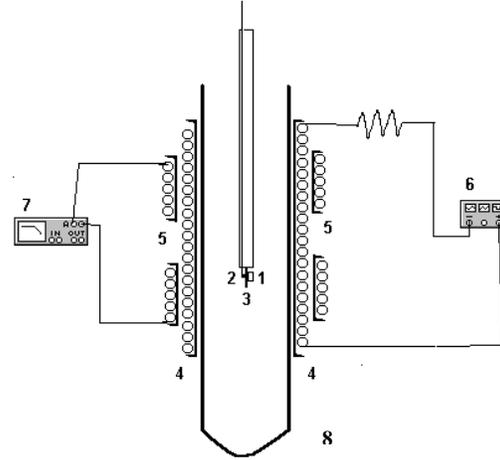


Figura 2. Circuito básico del susceptómetro
1.Muestra superconductora. 2.Resistencia de Platino 3.Chapa de Silicio. 4.Bobina primaria. 5.Bobinas Secundarias. 6.Generador de funciones. 7. Lock-in. 8.Tubo de Pirex

El sistema de bobinas está compuesto por una bobina primaria con 600 vueltas, enrollada alrededor de un tubo de ensayo de pirex, sobre la cual se ubican 2 bobinas idénticas (secundario) en serie y enrolladas en sentido contrario entre sí, con aproximadamente 300 vueltas cada una, y que distan entre sí el mismo valor que su longitud. La bobina primaria es alimentada por un generador de funciones. El rango de frecuencias utilizadas es desde 1 hasta 10 khz.. En serie con la bobina primaria se anexo una resistencia de 1k Ω (o de 100 Ω) para que la variación de la resistencia del alambre que forma la bobina sea despreciable con respecto a dicha resistencia anexada. Cabe mencionar que tanto el bobinado primario como el secundario fueron hechos con alambre de cobre. Por último el bobinado secundario se conecta al Lock-in. Ver figura 2

La muestra superconductora se introduce en el tubo de pirex y se la posiciona de manera tal que quede a la altura de la bobina secundaria, como se puede ver en la figura 1. La muestra superconductora se encuentra pegada con grasa a una pequeña chapa de silicio, del otro lado de la chapa se halla una resistencia de platino, también pegada con grasa al silicio.

La resistencia de platino se la usa para medir la temperatura por el método de 4 puntas. La resistencia de platino tiene una calibración

estándar³ y el rango donde su comportamiento es lineal se encuentra entre los -240C hasta 850C .

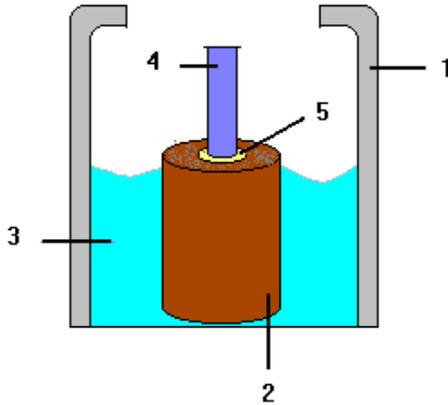


Figura 3. Sistema de enfriamiento. 1.Termo de acero. 2.Cobre macizo agujereado. 3.Nitrógeno líquido ($\text{temp}\sim 77\text{K}$) 4.Tubo de pirex con todo el sistema de bobinas. 5.Grasa siliconada

Todo el sistema anteriormente descrito debe ser enfriado en forma controlada. Para ello se lo ubica dentro de un cilindro de cobre macizo que posee una inercia a variar su temperatura. Así se sumerge todo en nitrógeno líquido produciendo un lento descenso de la temperatura. Ver figura 3

Método de medición

En la figura 4 se observa el arreglo experimental del susceptómetro ac.

La señal de salida del secundario es tomada por el Lock-in, que extrae de esta la señal de igual frecuencia que la suministrada al primario, pero con un desfase establecido respecto a la misma. De esta forma es medida la componente real o en fase χ' y la componente imaginaria o en contrafase χ'' . La señal de salida de Lock-in es tomada por una placa de adquisición (M.P.L.I.).

Se debe tener en cuenta que las bobinas secundarias no son exactamente iguales, por lo que agregan una fase a la señal de salida. Esta hace que la señal obtenida por Lock-in seteado en fase con la señal no sea exactamente la parte real de la susceptibilidad, o sea se esta observando una combinación lineal entre parte real y parte imaginaria como la que sigue

$$v' = v_0 \cos\theta + v_{90} \sin\theta \quad (10)$$

$$v'' = -v_0 \sin\theta + v_{90} \cos\theta$$

donde θ es el ángulo de desfase a encontrar.

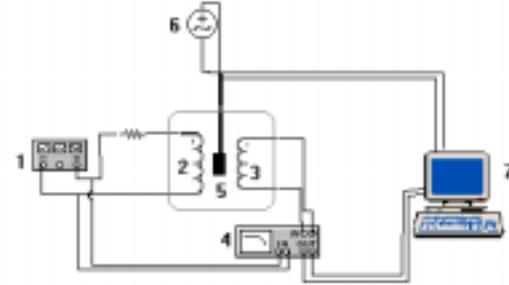


Figura 4. Circuito completo del susceptómetro. 1.Generador de funciones alimenta a 2.bobina primaria que induce sobre 3. Bobina secundaria, un potencial que es medido por 4.Lock-in, que como se aprecia esta conectado al generador para así poder discriminar la señal. 5.entre las bobinas se encuentra la muestra superconductor como así también la resistencia de platino, que es alimentada por 6. generador de corriente de 1mA. La señal del Lock-in como así también de la resistencia es tomada por la computadora

La señal entregada por la resistencia de platino también es tomada por la placa de adquisición, lo que nos permite el registro simultaneo de la tensión y la temperatura.

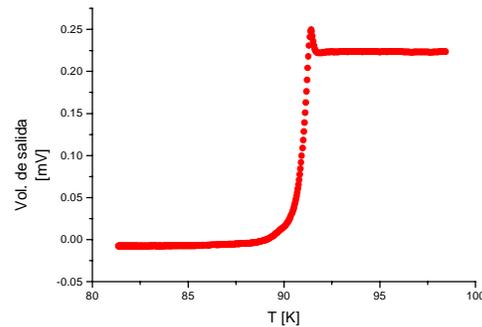


Figura 5. Medición directa del susceptómetro en fase con la señal de entrada. Aquí se aprecia claramente la combinación entre la parte real con la imaginaria

Resultados y análisis de datos

Una vez descompuestos los datos en parte real e imaginaria, se procede con la normalización. Este proceso ajusta los datos para que la componente real de la susceptibilidad esté entre 0 (cuando está en estado normal) y -1 (cuando está

en estado superconductor) y para la componente imaginaria se usa la misma calibración. Este proceso se encuentra justificado por la ecuación 9 donde se ve claramente que la susceptibilidad es directamente proporcional al voltaje obtenido en las bobinas secundarias

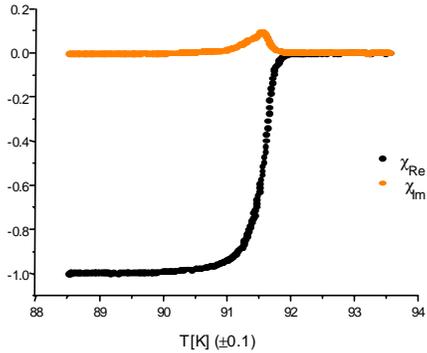


Figura 6. Partes real e imaginaria de la susceptibilidad del superconductor en un campo de 0.1 gauss.

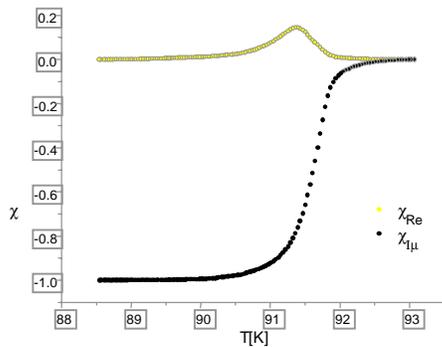


Figura 7. Susceptibilidad de la muestra superconductora para un campo de 6.2 gauss

En las figuras 7 y 8 se grafican la parte imaginaria como una función de la parte real de la susceptibilidad. Nótese que el máximo de susceptibilidad imaginaria varía según el campo aplicado.

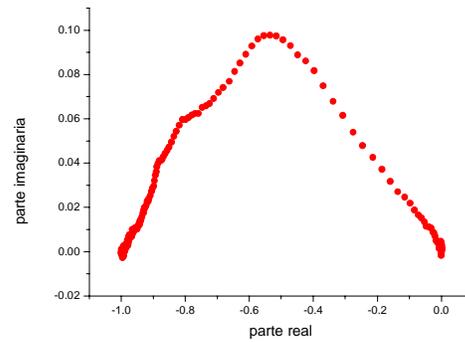


Figura 8. Susceptibilidad en sus dos componentes para un campo de 0.1 gauss

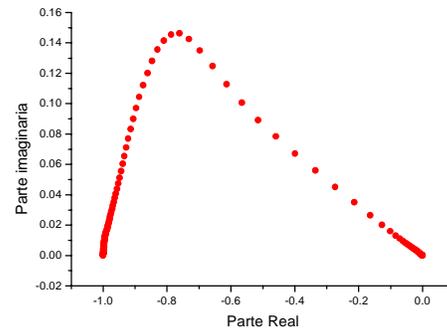


Figura 9. Susceptibilidad en sus 2 componentes para un campo de 6 gauss

Conclusiones

En este experimento se buscó principalmente tomar contacto con un material superconductor de alta temperatura, sus características y un método de medición de las mismas.

Como primera conclusión se puede señalar el valor de la temperatura de transición de fase del material, obtenido a partir de sucesivas mediciones y tomando el valor medio de la temperatura de transición de cada una para finalmente obtener un valor estadístico. Este proceso arroja un valor de 91.1 ± 0.1 K. Este valor se encuentra dentro de lo esperado ya que el mismo material ya ha sido testeado.

Las figuras 6 y 7 muestran el comportamiento de las componentes real e

imaginaria de la susceptibilidad como una función de la temperatura.

La componente real da una medida de cómo el campo magnético aplicado es expulsado del material a medida que se produce la transición de fase (efecto Meissner). Este valor varía entre 0, campo totalmente dentro del material, y -1 para el campo ya expulsado.

La componente imaginaria está relacionada con la energía disipada por el material a medida que la transición se produce.

Las figuras 8 y 9 muestran como la energía es disipada a medida que el campo es expulsado del material superconductor. Las pérdidas alcanzan un máximo cuando las corrientes superficiales alcanzan una profundidad en el material del orden de su radio. Los valores de disipación máxima obtenida también están dentro de los valores obtenidos por otros trabajos⁴.

Problemas y soluciones técnicas

Durante la experiencia se encontraron varias situaciones problemáticas que creemos conveniente discutir.

El sistema de enfriamiento tiene la gran desventaja de que se condensa aire dentro del tubo de ensayo de pirex, produciendo que se condense oxígeno. Esto trae un problema debido a que el oxígeno líquido es paramagnético produciendo un cambio en el flujo del campo que no es deseado. Esto se puede solucionar trabajando al vacío. También es importante destacar que la humedad es otro factor fundamental a tener en cuenta.

Como las bobinas están hechas con alambre de cobre y el mismo varía su resistencia con la temperatura, se produce el efecto indeseado de un cambio en el flujo del campo magnético.

Se debe asegurar que la resistencia de platino esté en contacto directo con la chapa de silicio.

El mayor problema se encontró a la hora de procesar los datos: es mucho más conveniente medir simultáneamente la susceptibilidad en sus dos componentes. Esto permite una rápida correlación entre ambas.

Referencias

¹ Reitz/Milford/Christy, Fundamentos de la teoría electromagnética, 3^{ra} edición, Addison-Wesley iberoamericana, 1984, Cap 15.

² Martín Nikolo, "Superconductivity: A guide to alternating current susceptibility measurements and alternating current susceptometer design", Am. J. Phys. **63**, 57-65 (1995)

³ SENSYCON-Temperature measurement in low temperatures with Platinum Resistance Elements. http://www.sensycon.com/txt/txt_21fe.htm

⁴ Hernan J. Ferrari, Tesis de Licenciatura: "Susceptibilidad magnética AC y campo magnético intergranular en superconductores de alta temperatura crítica", Universidad de Buenos Aires, 1993.