

Actividad VI.62 – Transiciones de fase en superconductores

Objetivo

Observación de la transición de fase superconductora y determinación de la temperatura de transición. Medición de resistividad y susceptibilidad magnética.

Introducción

Algunos metales, aleaciones, óxidos y compuestos orgánicos se vuelven superconductores cuando se los enfría por debajo de una *temperatura crítica*, T_c . La fenomenología del estado superconductor presenta algunas notables características.^[1,2] Por un lado el material superconductor pierde su resistencia eléctrica y por lo tanto no disipa energía en forma de calor cuando por él circula una corriente eléctrica. Un superconductor también se comporta como una sustancia diamagnética perfecta. Este fenómeno se conoce como efecto Meissner.^[1,2] En presencia de un campo magnético moderado, un superconductor genera corrientes superficiales que dan lugar a una magnetización inducida que cancela el campo magnético en su interior. En otras palabras, el superconductor expulsa el campo magnético de su interior. Estos efectos están ausente a temperaturas mayores que T_c , para las cuales el material presenta un comportamiento normal.

El objetivo de esta actividad es estudiar con distintos métodos la transición superconductora de un superconductor de alta temperatura crítica. La disponibilidad actual de estos materiales con temperaturas críticas cercanas a los 90 K, simplifica los requerimientos criogénicos para llevar a cabo estos experimentos, pudiéndose usar Nitrógeno líquido ($T_{N_2} = 77$ K) como refrigerante, que es accesible en muchas universidades y laboratorios o puede comprarse a un costo reducido.

Proyecto 1.- Medición de la transición resistiva

Equipamiento recomendado: Una muestra superconductor de alta temperatura crítica ($T_c > 77$ K). Un miliamperímetro. Un microvoltímetro conectado a una PC o bien un sistema de adquisición por computadora con un amplificador de instrumentación. Una fuente de alimentación. Pintura de plata conductora.

Una manera de estudiar la transición de un material al estado superconductor es midiendo la resistencia eléctrica de una muestra en función de la temperatura. Para esto se hace circular una corriente eléctrica I por el material y se mide la caída de potencial V que esta corriente produce. Cuando la muestra se enfría por debajo de su temperatura de transición al estado superconductor, la resistencia eléctrica desaparece y por tanto este voltaje será nulo.

Muestras policristalinas de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ o $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ son adecuadas para este experimento, puesto que sus temperaturas críticas ($T_c = 92$ K y 85 K, respectivamente) están bien por arriba de la temperatura del nitrógeno líquido. Además estas muestras policristalinas se consiguen de tamaños manejables, y pueden obtenerse de laboratorios especializados o bien comprarse a proveedores de productos de laboratorio.^[3] Existen pastillas superconductoras de unos 20 mm de diámetro y 5 mm de alto, de donde se puede cortar la muestra a medir. El corte puede hacerse con una sierra de hoja fina, tras lo cual se ajusta la geometría a la deseada usando un papel de lija de grano fino. Siempre conviene que la muestra sea lo más larga posible ($l > 10$ mm) y del menor ancho ($a < 2$ mm) y espesor ($d < 0.3$ mm) que se puedan obtener (suponemos una muestra de sección rectangular).

Sobre la muestra hay que ubicar cuatro *contactos*, como se muestra en la Fig. 62.1. Dos de los contactos se ubican en los extremos y se denominan *contactos de corriente*; por ellos se inyecta y extrae la corriente que se aplica. Los contactos interiores son los *contactos de voltaje* y entre esos puntos se mide la caída potencial. Estos contactos se hacen pegando sobre la muestra alambres finos de cobre o platino (diámetro entre 0.05 y 0.1 mm) con pintura conductora (pintura de plata). Si la muestra es suficientemente grande (de más de 10 mm de largo), no hay mucha dificultad para pegar los alambres. Una vez fijados los alambres es recomendable calentar la muestra hasta aproximadamente 100 °C, colocándola, por ejemplo, sobre la platina de un calentador eléctrico. Este tratamiento

térmico simple facilita el secado de la pintura y permite una leve difusión de la pintura conductora en la muestra, lo que redonda en mejores contactos. También se consigue una mejor rigidez mecánica a la unión del alambre a la muestra. La calidad de los contactos se evalúa midiendo la “resistencia de contacto”. Para esto puede conectarse la muestra a un óhmetro usando dos de los alambres de conexión ya pegados. Dado que el óhmetro medirá las resistencias en serie de la muestra, de los alambres y de los contactos (unión pintura–muestra), esta última pueden estimarse por diferencia. No es aconsejable iniciar el enfriamiento de la muestra si se advierte que la resistencia de contacto es demasiado alta (resistencias mayores que 100Ω), porque esto suele ser indicativo de una incorrecta fijación del contacto, y se correrá el riesgo de que alguno o varios se despeguen cuando se los enfríe. Por otra parte una alta resistencia de contacto disipará calor Joule cuando pase la corriente de medición y esto puede producir un calentamiento indeseado de la muestra. Dado que esta resistencia de contacto es menor cuando mayor es el área de contacto, los contactos de corriente pueden hacerse sobre los bordes de la muestra abarcando todo el espesor (ver Fig. 62.1). Esto asegura también que en la muestra haya una distribución de corriente más homogénea.

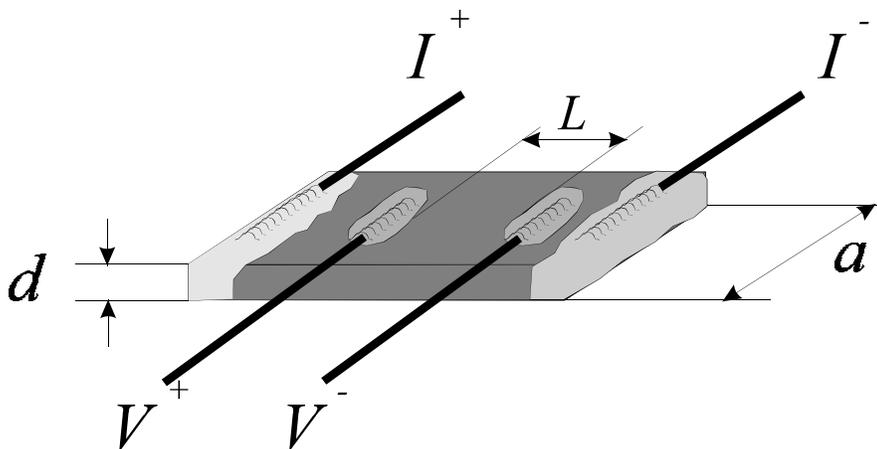


Figura 62.1 Muestra con contactos. La corriente se inyecta y extrae por los extremos. La caída de potencial se mide entre los contactos internos separados una distancia L .

La muestra se ubica en un portamuestras, que es un bloque metálico, preferentemente de cobre. Este portamuestras puede colocarse en el extremo de un caño de acero inoxidable y debe tener un termómetro para medir la temperatura (un Pt-100 o un diodo calibrado son adecuados, ver Actividad V.49), como se ilustra en la Fig. 62.2.a. El

termómetro puede instalarse en un orificio practicado en el portamuestras, donde calce bien ajustado para una buena termalización con este bloque metálico. Otra opción es ubicarlo en una cápsula de cobre que se pueda atornillar firmemente al portamuestras. A su vez, la muestra debe estar en muy buen contacto térmico con el termómetro, lo que puede lograrse ubicándola muy próxima a él. El portamuestras puede cubrirse con un papel fino (puede ser papel de cigarrillos) sobre el cual se pegue la muestra con una capa delgada de alguna grasa no conductora (grasa siliconada o grasa de vacío, por ejemplo) o usando un barniz apropiado. El uso de una pantalla de radiación que encierre al portamuestras puede ayudar a la termalización de todo el conjunto.

Para enfriar la muestra se procede a introducir el portamuestras en un termo o *dewar* (Fig. 62.2.b). Si el termo se llena con Nitrógeno líquido hasta un cuarto de su volumen aproximadamente, se establecerá en su interior un gradiente térmico apreciable (entre 77 K y casi temperatura ambiente). Por lo tanto, si se mantiene fijo el portamuestras a distintas alturas dentro del termo, la temperatura del sistema puede fijarse con cierta estabilidad. Para esto debe esperarse que el portamuestras termalice y con él la muestra y el termómetro. La resistencia de la muestra debe medirse recién cuando el termómetro dé una lectura estable.

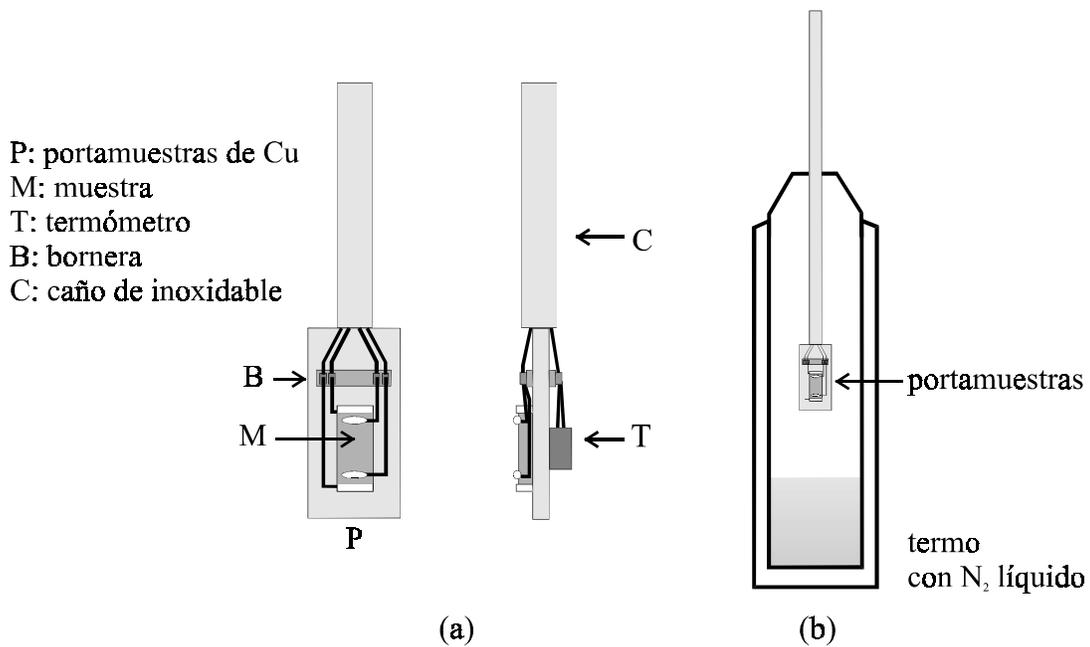


Figura 62.2 a) Esquema de un portamuestras. Los cables de conexión se sueldan a una bornera y se sacan por el tubo de acero inoxidable. El portamuestras puede cubrirse con una pantalla térmica. b) Termo con Nitrógeno líquido donde se introduce el portamuestras.

La Fig. 60.3 muestra esquemáticamente el circuito para la medición de la resistencia de la muestra. A la muestra se aplica una corriente entre 1 mA y 10 mA. Dependiendo del tamaño de la muestra, un microvoltímetro puede tener sensibilidad suficiente para medir el voltaje. Para ver esto, supongamos que usamos una muestra de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, que tiene una resistividad $\rho \approx 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ a temperatura ambiente. Si aplicamos una corriente $I = 10 \text{ mA}$ a una muestra de 2 mm de ancho (a) y 0.2 mm de espesor (d), con contactos de voltaje separados una distancia $L = 10 \text{ mm}$, el voltaje que se mide a temperatura ambiente será:

$$V = R \cdot I = \rho \cdot \frac{L}{A} \cdot I \approx 2 \text{ mV}$$

donde A es el área transversal de la muestra, $A = a \cdot d$. Si queremos observar la transición resistiva del superconductor siguiendo su cambio de resistencia desde temperatura ambiente y midiendo su variación en por lo menos dos órdenes de magnitud, tenemos que contar con un voltímetro que aprecie $\approx 10 \mu\text{V}$. De estas estimaciones vemos la conveniencia de usar una muestra larga (para que haya lugar para ubicar contactos de voltaje separados, $V \propto L$) y fina (para que haya mayor densidad de corriente, $V \propto I/A$). Un

modo de medir estos voltajes es usar un microvoltímetro conectado a una PC o bien un sistema de adquisición por computadoras asociado a un amplificador de instrumentación, sensible a unos pocos microvoltios. Para reducir los efectos de ruido en la señal es conveniente tomar el valor medio de varias mediciones del voltaje; con este procedimiento el efecto del ruido puede reducirse considerablemente.

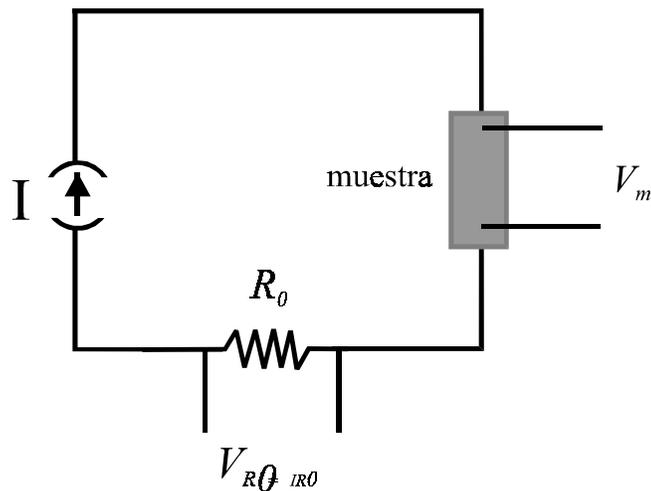


Figura 62.3 Circuito para medir la resistencia de la muestra.

- Prepare una muestra superconductor para la medición de resistencia y mida su resistencia en función de la temperatura, $R(T)$. Observe la transición resistiva y defina:
 - ✓ Temperatura crítica, T_{c0} : temperatura del comienzo de la transición, es decir la temperatura a partir de la cual la resistencia de la muestra se aparta del comportamiento normal y empieza a disminuir apreciablemente.
 - ✓ Temperatura de resistencia nula, T_{c1} : temperatura para la cual, dentro de la resolución experimental, se anula la resistencia de la muestra.
 - ✓ Ancho de transición, ΔT : diferencia de temperaturas donde la resistencia alcanza el 90% y el 10% de su valor correspondiente a T_{c0} (“criterio 10%–90%”).

- **Análisis opcional:** Un modelo para describir el comportamiento de un superconductor policristalino es el *modelo granular*, ver Fig. 62.4.

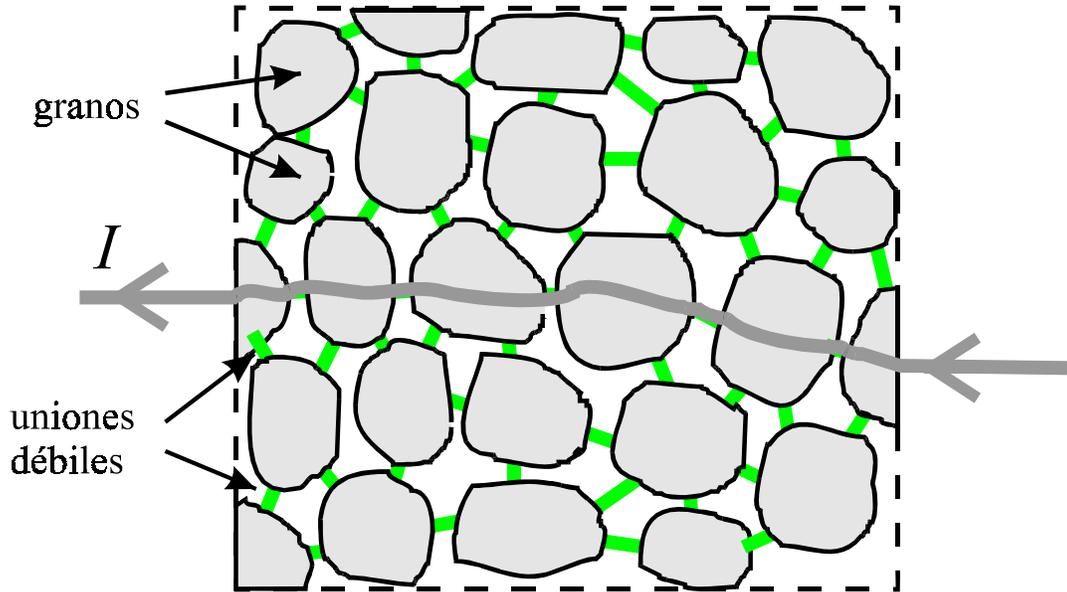


Figura 62.4 Modelo granular para un superconductor policristalino. Los granos tienen temperatura crítica $T_{c,g}$ y están acoplados por uniones débiles que tiene una menor temperatura crítica, $T_{c,u} < T_{c,g}$.

El superconductor se modela como un aglomerado de granos superconductores, con temperatura de transición $T_{c,g}$, acoplados entre sí por uniones débiles que se vuelven superconductoras a una temperatura $T_{c,u} < T_{c,g}$. Cuando se reduce la temperatura de la muestra, son los granos los que primero se vuelven superconductores, es decir que alrededor de $T_{c,g}$ sólo una fracción de la muestra se vuelve superconductor. Dado que las uniones se vuelven superconductoras recién a menor temperatura, aun no hay un camino continuo de resistencia nula a través de la muestra y la resistencia medida sigue siendo finita. Una vez que la temperatura se reduce más, las uniones (en serie con los granos) se vuelven superconductoras y la corriente encuentra caminos sin disipación a lo largo de toda la muestra. Como resultado, es común observar que la resistencia se va a cero en dos etapas: una donde la resistencia cae rápidamente debido a la transición de los granos, y otra, “la cola de la transición”, donde se realiza la transición de las uniones entre granos. Una manera de poner a prueba este modelo consiste en medir la transición resistiva

con distintas intensidades de la corriente aplicada. Las uniones débiles son más sensibles que los granos al valor de la corriente que circula. En otras palabras, tienen menor “corriente crítica”, que es la máxima corriente que pueden transportar sin que se produzca disipación. Esta corriente crítica disminuye con la temperatura, por tanto se puede esperar observar un mayor ensanchamiento de la transición hacia la zona de menor temperatura (reducción de T_{cI}) cuando mayor sea la corriente de medición.

- ✓ Obtenga curvas $R(T)$ en la transición usando distintas intensidades I de la corriente de medición. Aumente la corriente en la medida que ésta no caliente a la muestra por disipación en los contactos. Analice las curvas obtenidas y observe si hay una fracción de la caída de resistencia que no dependa de la corriente de medición y otra que sí. En tal caso, discuta si puede explicar los datos usando el modelo granular.
- ✓ De las curvas medidas $R(T)$, obtenga T_{cI} para cada calor de I . Asocie T_{cI} como la temperatura donde la densidad de corriente aplicada a la muestra, $j = I/A$ (A es el área transversal de la muestra) iguala a la corriente crítica del material, j_c . Represente gráficamente $j \equiv j_c$ en función de la temperatura.

Proyecto 2.- Medición de la transición magnética – Efecto Meissner

Equipamiento recomendado: Una muestra superconductora de alta temperatura crítica ($T_c > 77$ K). Dos multímetros y un generador de funciones.

En este proyecto nos proponemos detectar la transición superconductora a través de la observación del apantallamiento magnético del superconductor.^[4] Para ello proponemos realizar mediciones inductivas de la susceptibilidad magnética. Un dispositivo simple que sirve para estas mediciones se muestra esquemáticamente en la Fig. 62.5.

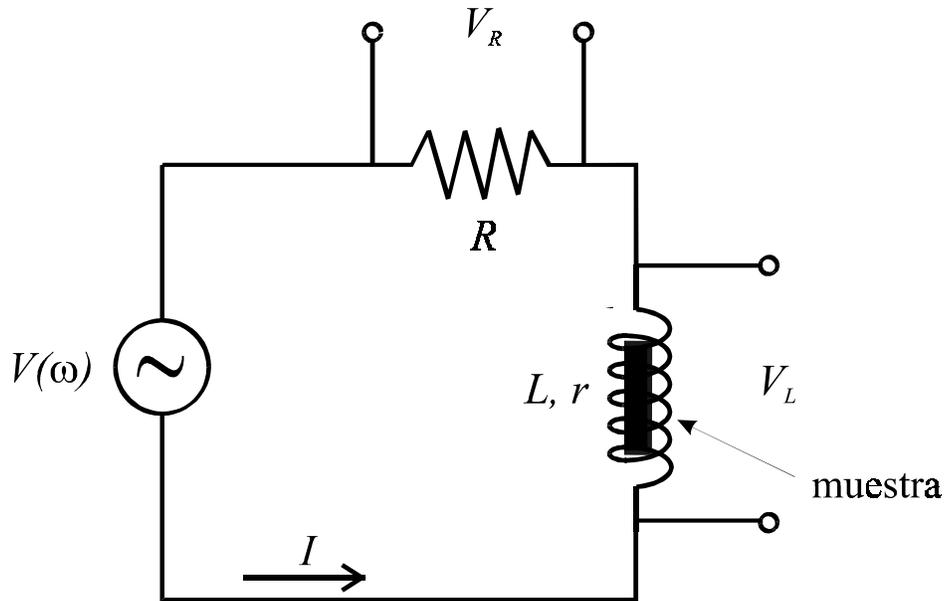


Figura 62.5 Diagrama esquemático del dispositivo para medir la susceptibilidad magnética.

Un generador de funciones está conectado a una resistencia limitadora R y una bobina de autoinductancia L y resistencia r (circuito RL). Midiendo el voltaje a través de la resistencia, V_R , podemos conocer la corriente que circula por el circuito:

$$I = \frac{V_R}{R} \quad (62.1)$$

El voltaje en la bobina es:

$$V_L = I\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2} \quad (62.2)$$

de donde

$$L = \omega^{-1} \sqrt{\left(\frac{V_L}{I}\right)^2 - r^2} = \frac{1}{\omega} \cdot \sqrt{\left(\frac{V_L}{V_R}\right) \cdot R^2 - r^2} \quad (63.3)$$

Aquí V_R y V_L son los valores eficaces de las respectivas caídas de potencial, y pueden medirse con un voltímetro de 3½ dígitos. Para medir la corriente también usarse un multímetro en el modo amperímetro conectado en serie con la fuente, la resistencia y la bobina. Para obtener señales apreciables en la bobina, es conveniente usar frecuencias del orden del kHz o mayores. Debemos referirnos a los manuales de los instrumentos de medición para ver si son capaces de medir correctamente a estas frecuencias.

En el caso general en que la bobina contenga una muestra magnética de susceptibilidad χ y permeabilidad $\mu = \mu_0(1 + \chi)$, el flujo magnético a través de la bobina cambiará. El flujo aumentará si la muestra es paramagnética o ferromagnética; y disminuirá si la muestra es diamagnética, como es el caso de un superconductor. En particular, si la bobina estuviera inmersa en un medio de permeabilidad μ , el flujo del campo B en la bobina aumentaría en un factor $(1 + \chi)$ comparado con el flujo de la misma bobina vacía (tomamos en este caso: $\mu = \mu_0, \chi = 0$). La inductancia de la bobina en el medio también sería más grande por el mismo factor:

$$L = L_0(1 + \chi) \quad (62.4)$$

de donde se obtiene:

$$\chi = \frac{L}{L_0} - 1 \quad (62.5)$$

donde L_0 es la inductancia de la bobina vacía. Estas ecuaciones se mantienen correctas si la muestra que coloquemos ocupa todo el volumen de la bobina. Si la muestra no llena todo el espacio donde la bobina produce el campo magnético, la Ec.(90.5) se modifica:

$$\chi = \alpha \cdot \left(\frac{L}{L_0} \right) - 1 \quad (62.5)$$

donde α es un factor menor que uno (“factor de llenado”), que es necesario conocer solo si deseamos calibrar el dispositivo para obtener valores absolutos de la susceptibilidad de la muestra. Para un estudio como el que se propone aquí, donde lo que se busca es estudiar la variación relativa de χ para detectar la transición superconductor-normal, no es del todo necesario conocer α .

El experimento consiste en medir I , r y V_L en función de la temperatura. Usando la Ec.(62.3) podemos conocer el valor de la autoinductancia de la bobina. Cuando la muestra pase al estado superconductor, la susceptibilidad cambiará de $\chi = 0$ a (idealmente) $\chi = -1$ (diamagnetismo perfecto), lo que quedará evidenciado en un cambio significativo de L .

Es aconsejable que las dimensiones de la bobina se ajusten al tamaño de las muestras disponibles. Debe tenerse en cuenta también que cuanto mayor sea el número de vueltas de la bobina, mayor será su sensibilidad para detectar cambios de la

susceptibilidad del material que contenga. Como ejemplo mencionamos que una bobina de entre 200 y 300 vueltas de alambre delgado que ocupe una longitud de aproximadamente 1 cm, es por lo regular adecuada para muestras de dimensiones aproximadas de $(3 \times 3 \times 0.5)$ mm³. La bobina puede hacerse de varias capas y una manera práctica para construirla consiste en enrollar el alambre alrededor de un sorbete plástico de bebidas, pegando el alambre con un pegamento de secado rápido.

Para variar la temperatura, la bobina debe ubicarse en un bloque de cobre que se sumerja en nitrógeno líquido (77 K). Si el bloque de cobre es de masa adecuada, la variación de su temperatura será lenta una vez que se lo retire del líquido. Es aconsejable retirarlo y mantenerlo estacionado en el vapor, de manera que la temperatura varía desde los 77 K pasando suavemente por la transición del superconductor (para los superconductores de alta temperatura crítica $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ y $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$, $T_c \approx 90$ K). El bloque tiene que tener un termómetro para medir la temperatura. Lo más difícil es termalizar la muestra al bloque de cobre. Un método eficaz consiste en pegar la muestra a alambres de cobre (ver Fig. 62.6), y luego poner estos alambres en buen contacto térmico con el bloque. La muestra se coloca centrada en el interior de la bobina, y para evitar que se mueva puede usarse algodón para hacer dos tapones que la aprieten bien. Otra forma que puede considerarse consiste en colocar la bobina dentro de un vaso de poliuretano expandido que contenga arena.^[5] Se llena el vaso con nitrógeno líquido y se enfría la muestra. Cuando el líquido se evapora, el vaso comienza a calentarse suavemente y las mediciones se realizan durante el calentamiento. Desde luego que estos experimentos pueden hacerse usando un equipo criogénico más elaborado o en un criogenerador que permitan un control más preciso de la temperatura.^[5]

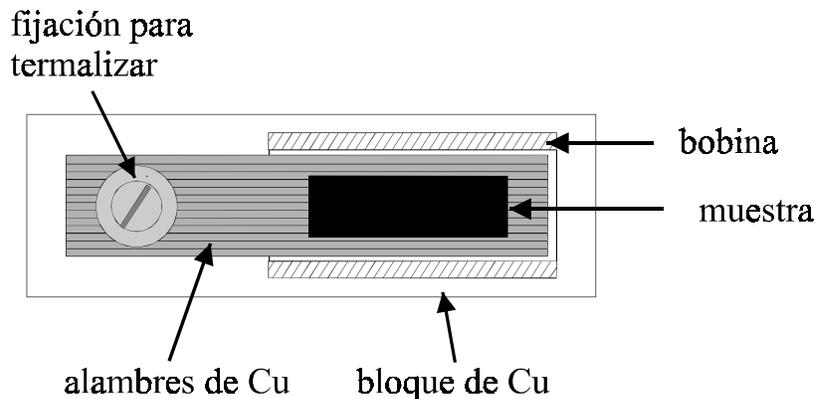


Figura 62.6 Ubicación de la muestra en la bobina sobre alambres de cobre que se termalizan a un bloque de cobre.

Caracterización del sistema:

- Mida la resistencia r de la bobina en función de la temperatura, T . Para esto puede reemplazar el generador de funciones en el circuito de la Fig. 62.5 por una fuente de voltaje o corriente continua, y medir la corriente I y la caída de tensión V_r ($r = V_r / I$), o bien medir r directamente con un multímetro funcionando como óhmetro.
- Usando el generador de funciones con una salida senoidal de frecuencia entre 1 kHz y 10 kHz, mida simultáneamente los voltajes V_R y V_L en función de la temperatura cuando la bobina está vacía. Use la Ec. (62.3) y los valores obtenidos de $r(T)$ para obtener L_0 en función de la temperatura. Tome a $L_0(T)$ como la “curva de fondo” del sistema medidor de susceptibilidad. En lo posible repita este experimento para observar si los ciclados de temperatura afectan significativamente a esta curva.

Medición de la susceptibilidad:

- Coloque una muestra superconductora dentro de la bobina y mida V_R y V_L en función de la temperatura. Obtenga L en todo el rango de temperaturas medido usando la Ec.(62.3) y los valores $r(T)$. Represente gráficamente L en función de la temperatura. Determine la temperatura de transición de la muestra usada como la temperatura a partir de la cual $L(T)$ se diferencia de la curva de fondo $L_0(T)$.
- Estudie la transición superconductora en función del campo magnético alterno aplicado. Para esto realice el experimento con distintas amplitudes de la corriente alterna I . Analice las curvas $L(T)$ obtenidas con distintos campos aplicados. En especial analice los valores de L a la menor temperatura que le permita medir su sistema, y discuta si en el rango de campos usados el apantallamiento superconductor depende del campo aplicado. Discuta los resultados usando el modelo granular para el superconductor policristalino. Recuerde que la muestra apantalla el campo magnético generando corrientes

inducidas. Si el campo es alto, estas corrientes deben ser mayores, y pueden llegar a superar los valores críticos de corrientes tolerables por las uniones débiles presentes en el superconductor policristalino.

Bibliografía

1. M. Thinkam, *Introduction to superconductivity* (McGraw Hill, New York, 1996).
2. C.P. Poole, Jr., H.A. Farach and R.J. Creswick, *Superconductivity* (Academic Press, 1995).
3. Entre las firmas proveedoras de muestras superconductoras está: Arbor Scientific: <http://www.arborsci.com/>. Una lista mas extensa de proveedores la encontrará en APS Buying Guide: <http://www.aps.org/pt/guide>.
4. H. G. Lukefahr, V. Priest, K. B. St. Jean, J. S. R. Worley, C. S. Yeager, D. A. Gajewski, and M. B. Maple, "A very simple and inexpensive apparatus for detecting superconducting transitions via magnetic screening," *Am. J. Phys.* **65**, 132 (1997).
5. M. Nikolo, "Superconductivity: A guide to alternating current demonstration and alternating current susceptometer design," *Am. J. Phys.* **63**, 57 (1995).