

Objetivo

En este experimento se estudia el fenómeno de histéresis y la transición de fases normal a magnética de materiales ferromagnéticos o ferrimagnéticos al pasar por la temperatura de Curie (o de Néel), T_C .

Introducción

Los materiales ferromagnéticos presentan, a temperaturas menores que una cierta temperatura T_C , llamada temperatura de Curie, una estructura de dominios magnéticos, que son pequeñas regiones del material dentro de las cuales existe una magnetización espontánea, M_S . En ausencia de campo magnético externo, estos dominios tienen, en general, orientaciones al azar, cancelándose macroscópicamente los efectos magnéticos microscópicos (de este modo se minimiza la energía asociada al campo magnético). En presencia de campos magnéticos externos, los dominios se orientan en la dirección del campo aplicado y también cambian sus tamaños. Si se remueve el campo los dominios no vuelven a sus estados originales, lo que da origen al fenómeno de histéresis en este tipo de materiales. Por otro lado, el valor de M_S cambia con la temperatura, anulándose para $T > T_C$. Para $T < T_C$, M_S tiene un comportamiento en función de la temperatura que puede modelarse como:

$$M_S(T) \propto [T - T_C]^\beta \quad (1)$$

donde el exponente $\beta \approx 0.3 - 0.4$.

Para los materiales ferrimagnéticos, la magnetización espontánea tiene un comportamiento similar al descrito por (1). En las referencias [1] y [2] se puede encontrar una discusión acerca de las características y diferencias que hay entre materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos.

Experimento

El dispositivo experimental consiste en una muestra de ferrita en forma de toroide (la ferrita es ferrimagnética y no-conductora de la electricidad), sobre la que se hacen dos arrollamientos de alambre conductor de aproximadamente unas 100 y 200 vueltas cada uno. El alambre debe elegirse esmaltado y de diámetro entre 0.2 y 0.3 mm. Estos arrollamientos forman el primario y secundario de un "transformador". Las dimensiones

del toroide sugeridas son las de uno de unos 5 cm de diámetro. En el Apéndice 2 se discute en detalle la relación entre el número de vueltas y las dimensiones del toroide.

Si aplicamos una tensión variable al primario, en el secundario se induce una fem ε que, según la Ley de Faraday, es:

$$\varepsilon = -N_2 \cdot \frac{d\Phi_B}{dt} \quad [2]$$

Donde N_2 es el número de vueltas en el secundario y Φ_B es el flujo magnético que atraviesa el secundario. Por lo tanto, la integral de la fem ε es proporcional al valor del campo magnético B en el cuerpo de la muestra. Si se mide la caída de tensión sobre una resistencia R_1 colocada en el circuito primario, es claro que la misma es proporcional a la corriente que circula en el primario y, por lo tanto, esta tensión será proporcional al valor del campo H en el toro. Como el secundario está conectado a la entrada de un osciloscopio o sistema de toma de datos de alta impedancia de entrada, por el secundario prácticamente no pasa corriente. La resistencia R_1 puede ser de algunas decenas de Ohms: 22Ω ó 33Ω pueden ser valores adecuados, pero asegúrese que la resistencia elegida pueda disipar la potencia que se producirá en la misma. Por razones de seguridad se recomienda fuertemente usar un transformador de buena calidad, que transforme tensión desde el valor de la tensión de línea (220 V) a aproximadamente 12 V. Asegúrese también que el dispositivo elegido sea un transformador que aisle eléctricamente el secundario del primario y no un autotransformador ó *variac*.

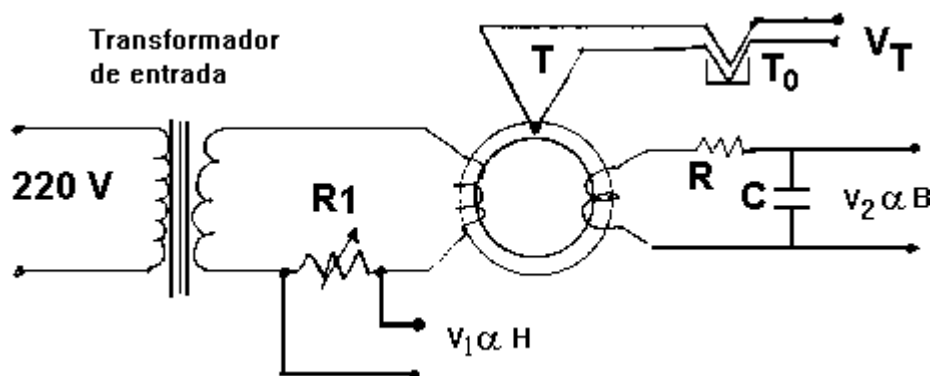


Figura 1. Diagrama esquemático del dispositivo experimental.

Nota: No conecte el toroide a la tensión de línea (220 V), puede destruir el bobinado primario o, pero aun, electrocutarse Ud. o algún compañero suyo! Use un transformador (no opte por un autotransformador o variac) de 220 V a 12 V aproximadamente, y alimente el primario del toroide intercalando en el circuito primario una resistencia R_1 en serie.

Para integrar la señal del secundario y obtener un voltaje proporcional a B , pueden usarse varias opciones. La más simple es usar un circuito RC como se indica en la figura, con una constante de tiempo $\tau \gg 2\pi / f$, donde f es la frecuencia aplicada. Si se

usa 50 Hz (frecuencia de línea), con $\tau \cong 5$ s se logrará una integración adecuada (ver Apéndice). Otra posibilidad es usar un integrador activo basado en amplificadores operacionales.

Actividad 1

Aplique la corriente alterna en el primario para producir un "barrido" de campo H . Con las señales del integrador (proporcional a B) y de la caída de tensión en la resistencia (proporcional a H) observe la curva de histéresis en el osciloscopio (o sistema de toma de datos por computadora) para la muestra magnética en estudio. El valor de B para $H=0$ (B_s en la Figura 2), es proporcional a M_s .

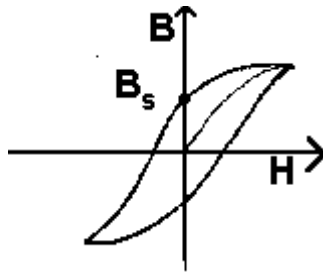


Figura 2. Diagrama esquemático de la curva de histéresis.

Actividad 2

Usando una termocupla previamente calibrada para medir la temperatura del toro, estudie como cambia la curva de histéresis para distintas temperaturas. Conecte la termocupla de modo de obtener la mejor medición que pueda de la temperatura del toroide. Para variar la temperatura de la muestra puede usar un horno o un baño de aceite, teniendo cuidado de que la temperatura del mismo no exceda $T \approx 250$ °C. A temperaturas superiores se puede quemar la aislación de los alambres.

Una vez calentado el toro retírelo del horno o apague el calentador del baño de aceite y observe como varía la curva de histéresis para las distintas temperaturas.

- Describa este comportamiento y represente M_s en función de la temperatura T . Para caracterizar M_s use el valor de la tensión del integrador para $H = 0$ ($i=0$) (ver Figura 2).

- Para estudiar el comportamiento del material ferromagnético a bajas temperaturas, introduzca lentamente el dispositivo en aire líquido (evite los cambios bruscos de temperaturas para evitar que la ferrita se rompa). Estudie como cambia la curva de histéresis a bajas temperaturas.
- Finalmente con todos los datos obtenidos construya el mejor gráfico de $M_S(T)$ que pueda y determine a partir del mismo los valores de T_c y β [ver ecuación (1)]. Determine las incertidumbres de las dos magnitudes medidas.
- Consulte la bibliografía e intente dar cuenta, en forma semicuantitativa, de las observaciones realizadas.



Bibliografía

1. *Feynman lectures on physics*, vol. 2, R. Feynman *et al.*, Addison-Wesley, N.Y. (1964).
2. *Introduction to solid state physics*, C. Kittel, Reverté, Madrid (1965).
3. *A direct method for viewing ferromagnetic phase transition*, C.-S. Lue, *Phys. Teach.* **32**, 304 (1995).

Apéndice 1

Circuito integrador: Demuestre que si $\tau = RC \gg 1/\omega = 1 / (2\pi f)$, donde f es la frecuencia de la señal de entrada, el circuito de la Figura 3 actúa como un integrador. Para $f \cong 50$ Hz, valores de $R = 50 \text{ k}\Omega$ y $C = 10 \text{ }\mu\text{F}$ ($\tau = 0.5$ s) pueden ser razonables.

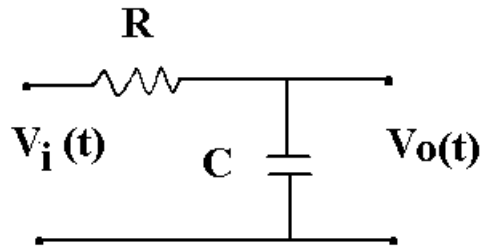


Figura3. Circuito integrador

Apéndice 2

Número de vueltas del primario: Para realizar este experimento, es necesario aplicar al toroide un campo magnético que lleve al material a una magnetización a un valor cercano al de saturación. Para la mayoría de los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos esto se logra a valores de $B \approx 5000$ Gauss = 0.5 Tesla. Supondremos, además, que la permeabilidad magnética del material es $\mu_r \approx 1000$. Si el radio medio del toroide es R_t y el número de espiras en el primario es N_1 , cuando por el primario circula una corriente i , según la ley de Ampere tenemos:

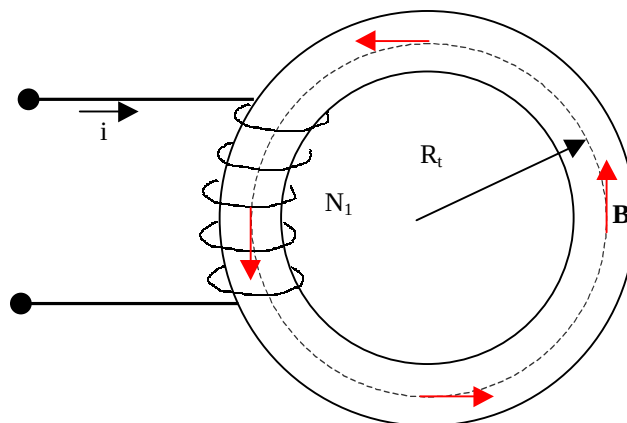


Figura 4. Enrollamiento primario sobre el toroide y orientación del campo magnético B producido. R_t es el radio medio de la muestra.

$$\oint B \cdot dl = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N_1 \cdot i \quad (A-1)$$

Haciendo uso de la simetría cilíndrica del problema tenemos:

$$B \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_t = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N_1 \cdot i \quad (A-2)$$

Como $B \approx 0.5$ T, tenemos:

$$\frac{i \cdot N_1}{R_t} \approx 2500 \frac{A}{m} \quad (A-3)$$

Para alambres de cobre esmaltado, la corriente máxima que puede pasar por él depende de su diámetro. Un criterio conservador consiste en usar aproximadamente 1 mm² de sección transversal por cada 2 A de corriente. Si la corriente es del orden de 0.5 A, los alambres esmaltados que forman el arrollamiento deben ser de por lo menos $\phi = 0.5$ mm de diámetro. En este caso tenemos que la relación "número de vueltas en el primario al radio medio del toroide" será:

$$\frac{N_1}{R_t[cm]} \approx 50 \quad (A-3)$$

Para el secundario puede usarse un número de vueltas similar o mayor que éste (en un factor entre 1 y 3), para que la señal del secundario (que es proporcional al número de vueltas del secundario) se vea con claridad en el osciloscopio. El diámetro del alambre con que se hace el secundario puede ser mucho más fino (por ejemplo, $\phi = 0.2$ mm, por él pasará poca corriente) de manera de aprovechar mejor el espacio sobre el toroide y lograr muchas vueltas.