

Instalación de altos campos magnéticos pulsados de la Universidad de La Habana: Caracterización de materiales magnéticamente duros

J.L. SÁNCHEZ LL. Y J.C. TÉLLEZ B.

Laboratorio de Magnetismo, IMRE, Universidad de La Habana
San Lázaro y L., La Habana 10400, Cuba

Recibido el 12 de febrero de 1993; aceptado el 19 de mayo de 1993

RESUMEN. En el presente trabajo se describe el sistema de aparatos que se ha desarrollado en el Laboratorio de Magnetismo de la Universidad de La Habana para generar y realizar mediciones magnetométricas en campos magnéticos pulsados de elevada intensidad. El sistema consta de un banco de capacitores de 2400 μF que permite almacenar hasta 30 kJ. Se ha desarrollado una bobina de alambre de cobre reforzada axial y radialmente que a temperatura ambiente permite la generación de campos pulsados de hasta 200 kOe (20 T). Se ha desarrollado el equipamiento necesario para la detección, procesamiento y registro de las señales dM/dt y dH/dt . Se esboza el principio físico de la determinación del campo de anisotropía (H_a) mediante la técnica del "singular point detection" y se presentan los primeros resultados experimentales en la determinación de esta magnitud en ferritas hexagonales y compuestos intermetálicos.

ABSTRACT. The present paper describes the pulsed field facility which has been set-up in the Laboratory of Magnetism of the University of La Habana. A maximum energy of 30 kJ can be stored in a 2400 μF capacitor bank which can be charged to a maximum voltage of 5000 V. A reinforced copper wire has been constructed; it allows the generation of pulsed magnetic fields up to 200 kOe (20 T) with the coil at room temperature. An electronic system is available in order to perform magnetometry measurements under pulsed fields; the system allows the detection, signal processing and digital recording of the dM/dT and dH/dt signals, respectively. For the determination of the anisotropy field (H_a) the singular point detection (SPD) technique has been employed; the principle of such a technique is briefly presented. Anisotropy field measurements on uniaxial ferromagnets such as hexagonal ferrites and Nd-Fe-B intermetallic alloys are reported.

PACS: 07.5S.+x,75.30.Gw

1. INTRODUCCIÓN

Los campos magnéticos intensos permiten estudiar una gran variedad de fenómenos magnéticos en sólidos. Entre los más importantes tenemos: las curvas de magnetización de sustancias paramagnéticas, la determinación del campo de anisotropía, el estudio de las transiciones de magnetización inducidas por campo, la medición del segundo campo crítico H_{c2} en superconductores, etc. Nuestro interés en este campo está relacionado con el estudio de materiales de alta anisotropía magnetocristalina para imanes permanentes.

Los imanes permanentes modernos se basan en compuestos de tierras raras y elementos del grupo de transición; en particular, Co y Fe. Dentro de éstos, los principales son: SmCo_5 ,

TABLA I. Valores de campo de anisotropía, H_a , a temperatura ambiente para los compuestos intermetálicos más utilizados como imanes permanentes [1].

Material	H_a (kOe)
SmCo ₅	300
Sm ₂ Co ₁₇	65
Nd ₂ Fe ₁₄ B	75

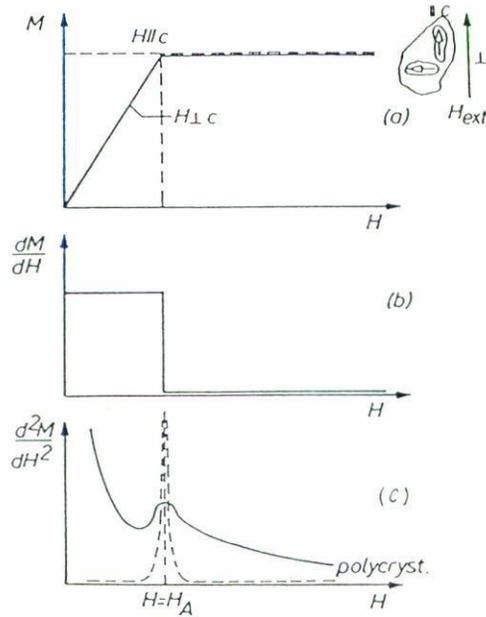


FIGURA 1. (a) Curvas de magnetización según el eje fácil (C) y perpendicular a este para una partícula monodominio que rota coherentemente su magnetización M ; (b) dM/dH vs. H perpendicular a C ; (c) d^2M/dH^2 vs. H perpendicular a C (trazo discreto); en trazo continuo aparece la curva que se obtiene para un policristal.

Sm₂Co₁₇ y Nd₂Fe₁₄B. Estos compuestos son uniaxiales y se caracterizan por su elevado campo de anisotropía (H_a) a temperatura ambiente según se muestra en la Tabla I.

Para un material uniaxial con constantes de anisotropía $K_1 > 0$ y $K_2 \sim 0$, H_a se define como el campo magnético que, aplicado perpendicularmente al eje de fácil magnetización C , satura una partícula monodominio que rota coherentemente su magnetización (M) según se ilustra en la Fig. 1(a). En este caso $H_a = 2K_1/M_s$, donde M_s es la magnetización de saturación.

El campo de anisotropía es una propiedad intrínseca que decide si un material puede ser utilizado como imán permanente, ya que esta magnitud determina el límite teórico de la fuerza coercitiva intrínseca (iH_c) que éste puede desarrollar.

En la práctica la manera que más comúnmente se emplea para determinar H_a consiste en aplicar un campo magnético paralelo y perpendicular al eje de fácil magnetización para una muestra anisotrópica y extrapolar ambas curvas M vs. H hasta que se intersecten;

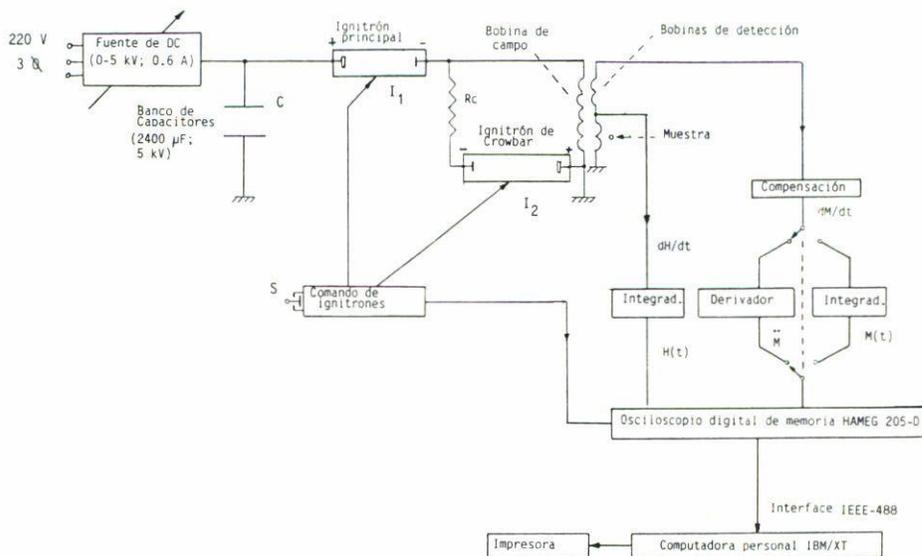


FIGURA 2. Diagrama de bloques de la instalación de campos magnéticos pulsados desarrollada en el Laboratorio de Magnetismo de la Universidad de La Habana.

este procedimiento también se ilustra en la Fig. 1(a). En rigor, para que la determinación sea correcta se debe utilizar un monocristal; sin embargo, lo más común es disponer de policristales orientados (ya sean sintetizados o en forma de polvos). Para determinar H_a y M_s en muestras policristalinas se requiere, en general, aplicar campos mucho mayores de los que se pueden obtener empleando electroimanes de laboratorio (que son alrededor de 20 kOe).

Nuestro laboratorio trabaja desde hace años en la obtención y caracterización de compuestos intermetálicos a base de tierras raras para superimanes, por eso resulta de vital importancia disponer de una instalación que permita la caracterización de estos materiales en campos magnéticos intensos.

En este trabajo se describe el magnetómetro de pulsos que se ha puesto en funcionamiento en el Laboratorio de Magnetismo de la Universidad de La Habana; éste permite generar campos magnéticos de corta duración y elevada intensidad. El sistema es el primero de su tipo en nuestro país y está basado en la descarga de una batería de condensadores sobre un solenoide de pocas espiras con núcleo de aire. Se describe el principio de medición de M y sus derivadas, que se basa en el método de inducción de Faraday, y la técnica del "singular point detection" [2] que permite determinar H_a en policristales. Se presentan también las primeras mediciones de campo de anisotropía realizadas en la instalación.

2. GENERACIÓN DE CAMPO Y MAGNETOMETRÍA EN CAMPOS MAGNÉTICOS PULSADOS

En la Fig. 2 aparece el diagrama de bloques de la instalación, éste podemos dividirlo en dos partes:

- a) Sistema de generación de campo. Constituido por una fuente DC regulable entre 0

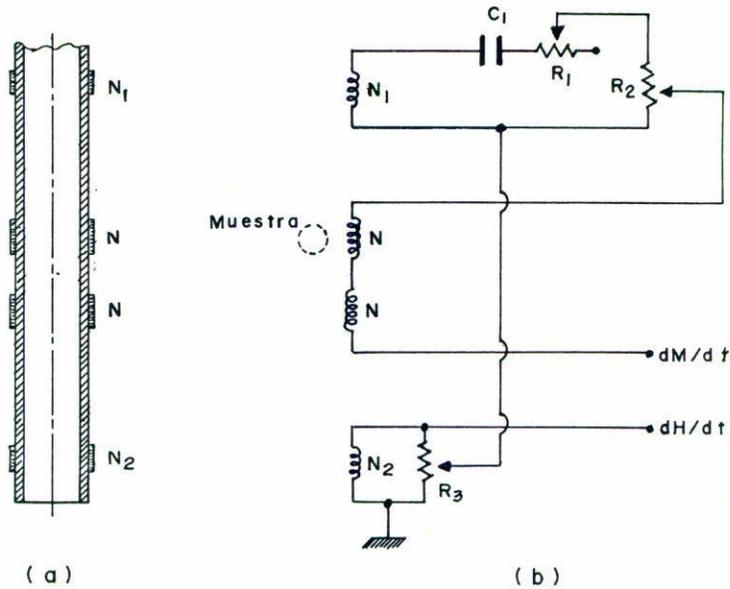


FIGURA 3. (a) Vista en corte del sistema de bobinas de "pick-up" utilizado (tipo N/N); (b) esquema eléctrico de las bobinas de "pick-up" mostrando el puente de balance utilizado ($C_1 = 47000 \text{ pF}$, $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = R_3 = 200 \Omega$).

y 5 kV, un banco de capacitores C de $2400 \mu\text{F}$ (24 condensadores de $100 \mu\text{F}$ conectados en paralelo, para una energía máxima $\frac{1}{2}CV^2 = 30 \text{ kJ}$), el sistema de descarga formado por ignitrones y la bobina de campo.

b) Sistema de detección, procesamiento y almacenamiento de las señales dH/dt y dM/dt . Este comprende las bobinas de detección o "pick-up", el sistema de compensación (formado por bobinas de compensación y el puente de balance; véase la Fig. 3), dos integradores y un derivador, y un osciloscopio con memoria digital. Este último se encuentra conectado mediante una interface estándar IEEE-488 a una computadora personal tipo IBM-XT que permite el procesamiento de las señales por software.

A continuación examinamos detalladamente su funcionamiento.

2.1. Generación de campos magnéticos pulsados

Mediante la fuente de alimentación, que se opera manualmente, se fija la tensión de carga del banco; antes de efectuar la descarga, éste viene desconectado de la red. Como interruptores (I_1 e I_2) se ha empleado el ignitrón modelo NL-1036 de la firma National. Sus características eléctricas son: tensión de pico máxima entre ánodo y cátodo $V_{\text{max}} = 15 \text{ kV}$, corriente de pico máxima $i_{\text{max}} = 35 \text{ kA}$.

Oprimiendo el interruptor S , se inicia el ciclo de medición: el comando de ignitrones envía un pulso con la energía necesaria (8 Joules) al ignitor de I_1 activando la conducción, esto descarga C sobre la bobina de campo.

Al cerrarse I_1 tenemos un circuito oscilante RLC serie. En este caso la corriente en la

bobina se puede determinar de la ecuación diferencial

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = 0; \quad (1)$$

teniendo en cuenta que $i_0 = 0$ y $V = V_0$ en $t = 0$, obtenemos que

$$i(t) = \frac{V_0}{Lw} \exp(-\mu t) \operatorname{sen} wt, \quad (2)$$

donde $\mu = R/2L$ y $w = (1/LC - R^2/4L^2)^{1/2}$; por tanto, la corriente máxima vendrá dada por

$$\begin{aligned} i_{\max} &= \exp \left[\left(-\frac{RT}{4\pi L} \right) \arctan \left(\frac{4\pi L}{RT} \right) \right] \sqrt{\frac{2E}{L}} \\ &= J \sqrt{\frac{2E}{L}}, \end{aligned} \quad (3)$$

donde E es la energía almacenada en C y el término $\sqrt{2E/L}$ nos da la corriente máxima para el caso ideal en que el sistema no tuviera pérdidas, estas se representan en la Ec. (3) por el término J . Otros factores que afectan la eficiencia en la generación de campo, no asociados a la resistencia del circuito, son: a) las pérdidas que se derivan de las características geométricas de la bobina (que pueden ser las mayores) y b) las que dependen de la inductancia parásita en el circuito (asociadas a la distribución espacial de los conductores). Para nuestro sistema la autoinductancia y la resistencia del circuito sin conectar la bobina de campo son $2.5 \mu\text{H}$ y $2 \text{ m}\Omega$, respectivamente.

En la práctica, el régimen oscilatorio amortiguado se usa poco, porque los capacitores son objeto de cargas y descargas a altas frecuencias que dañan el dieléctrico. Además, toda la energía electrostática almacenada en el sistema se transformaría en calor en la bobina calentándola por efecto Joule, lo que reduce rápidamente su vida útil debido al deterioro y eventual ruptura del aislamiento del conductor. Por tanto, el procedimiento que más frecuentemente se adopta consiste en disponer de un segundo interruptor I_2 que se activa en el instante en que la corriente ha alcanzado su valor máximo y por tanto la tensión en los extremos de la bobina es cero, esto permite insertar en paralelo la resistencia R_C . A partir de ese instante el sistema queda configurado como un circuito RLC en paralelo.

R_C comúnmente denominada resistencia de Crowbar, se escoge por debajo del valor crítico. Para amortiguamiento crítico en paralelo $R_C < \frac{1}{2} \sqrt{L/C}$, en concordancia con la ecuación diferencial que cumple la tensión en el circuito. En nuestro caso, $L = 21.7 \mu\text{H}$ y $C = 2400 \mu\text{F}$, por lo que $R_C \leq 47 \text{ m}\Omega$. La resistencia de Crowbar se construyó a partir de una lámina de acero, dispuesta longitudinalmente para minimizar la inductancia "pren-sada" entre dos disipadores de aluminio; su resistencia es $41 \text{ m}\Omega$. En estas condiciones, el pulso de corriente en la bobina (y por tanto de campo) aumentará sinusoidalmente hasta

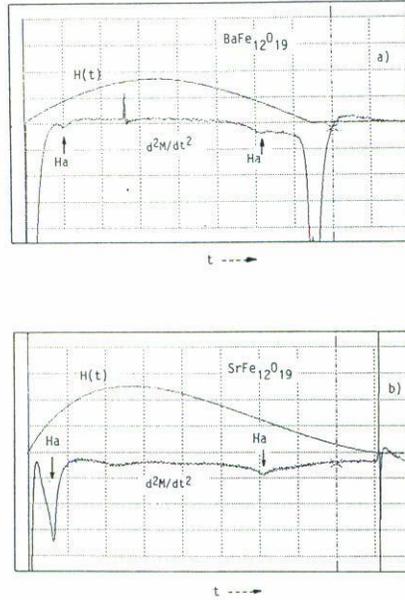


FIGURA 4. (a) d^2M/dt^2 y $H_{ext}(t)$ para un policristal isotrópico sinterizado de $BaFe_{12}O_{19}$; (b) d^2M/dt^2 y $H_{ext}(t)$ para un policristal anisótropo sinterizado de $SrFe_{12}O_{19}$. El campo de anisotropía medido es de 18.4 kOe.

su valor máximo y disminuirá exponencialmente hasta cero, esto se observa claramente en la curva $H(t)$ de la Fig. 4(b). La duración del pulso es de 1.6 ms.

El sistema permite también obtener otras formas de pulso conectando adecuadamente un diodo de alta potencia, a saber: i) medio período de onda sinusoidal (véase Fig. 4(a)), y ii) un período de onda sinusoidal. La disposición circuital en cada caso se puede consultar en la Ref. [3]. Con este propósito se conectaron en serie dos diodos A730D de la firma Richardson Electronics Ltd, sus principales características son: tensión inversa máxima $V_{RRM} = 2400$ V y corriente máxima en un ciclo de 8.3 ms $I_{FSM} = 25$ kA.

La rotura mecánica del solenoide es uno de los problemas principales y una limitación de peso cuando se producen campos magnéticos intensos. Baste recordar que teóricamente el tensor de esfuerzos de Maxwell es proporcional al cuadrado de la intensidad de campo [4].

La bobina de campo construida posee tres capas de vueltas hechas con alambre de cobre de sección rectangular (2.5×4 mm²). El enrollado viene reforzado con hilo de vidrio y una coraza cilíndrica de poliamida de 1 cm de espesor, sobre la cual se enrolla otra capa de hilo de vidrio [3]; todo este arreglo fue embebido en resina epóxica. Tal reforzamiento mecánico se debe a que las fuerzas de Lorentz que se generan entre las espiras en el momento de la descarga producen una fuerte compresión axial y expansión radial [5]. La bobina que sujeta axialmente entre dos discos de baquelita para evitar vibraciones.

Sus características físicas a temperatura ambiente son: diámetro interior: 20 mm; longitud: 70 mm; inductancia: $L = 21.7$ μ H y resistencia en serie $R = 18$ m Ω . A una distancia de 1 cm del centro, según el eje vertical z , la intensidad del campo decrece no más del 1%. Para medir el campo en la bobina se utilizó un gaussmetro modelo 102D de la firma

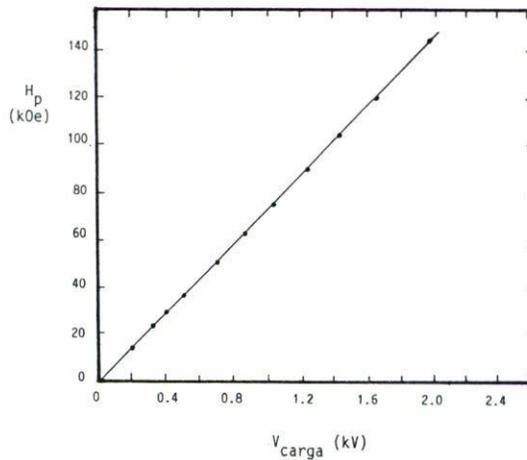


FIGURA 5. Valor pico de campo magnético H_p medio en el centro geométrico de la bobina de campo en función de la tensión de carga del blanco de capacitores.

Redcliffe que mide H en régimen de pulsos con un error relativo de 1%. En la Fig. 5 se reporta la dependencia del valor pico de campo H_p en función de la tensión de carga, la medición se efectuó en el centro geométrico de la bobina. La linealidad de la curva refleja que hasta 2.0 kV no se han producido deformaciones plásticas o irreversibles en la bobina. Esta medición quedó limitada por el rango de trabajo de la sonda de Hall empleada; una caracterización ulterior de la bobina de campo se realizó una vez que el sistema fue calibrado en campo empleando una muestra patrón con H_a conocido (ver epígrafe 3.2), esto nos permitió determinar que en la bobina construida se pueden generar repetiblemente campos de hasta 200 kOe (20 T) sin que experimente un deterioro sensible.

2.2. Magnetometría en campos magnéticos pulsados

Supongamos una bobina de detección con N espiras y radio r , dispuesta axialmente dentro de la bobina de campo. Si se aplica un pulso de campo $H(t)$ en ella se induce una señal proporcional a dH/dt . Si colocamos ahora una muestra magnética en su interior, la señal inducida será proporcional a dB/dt , donde $B = H + 4\pi M$; es decir, ésta contiene información sobre la magnetización. El sistema de "pick-up" para medir M (o sus derivadas), debe estar formado al menos por dos bobinas compensadas en flujo y conectadas en serie-oposición; en ausencia de muestra la señal debe ser cero. El sistema de "pick-up" se dispone axialmente en la región de homogeneidad espacial de campo (2 cm) y la muestra se coloca dentro de una de las bobinas de detección.

Los sistemas de "pick-up" pueden ser axiales o coaxiales [6]. El sistema utilizado por nosotros es axial de tipo N/N [6] y su vista en corte aparece en la Fig. 3(a). En este caso la condición de compensación es sencillamente $N_1 = N_2$ y $r_1 = r_2$, y el grado de compensación es proporcional a $[1 - (r_2/r_1)^2]$; por esto es importante controlar cuidadosamente el diámetro del soporte sobre el que se va a enrollar. En nuestro caso, se enrolló sobre un soporte de baquelita de diámetro 6 ± 0.01 mm; cada bobina posee una capa de 30 vueltas

y se construyó utilizando alambre barnizado de cobre de 0.1 mm. Las terminales de las bobinas quedan trenzados y dispuestos según el eje z para que no corten las líneas de campo y evitar la inducción de señales parásitas. El grado de compensación alcanzado fue de 10^{-3} lo que resulta satisfactorio para el tipo de medición que se pretende realizar. La sensibilidad del "pick-up" queda determinada por el número de vueltas y el factor de llenado de la muestra en la bobina de medición.

El sistema de "pick-up" queda complementado con dos bobinas adicionales N_1 y N_2 dispuestas simétricamente según se representa en la Fig. 3(a). De una de estas bobinas (N_2), se extrae la señal dH/dt . La sustracción de las señales provenientes de N_1 y N_2 permite centrar el "pick-up" en la región de homogeneidad espacial de campo. Es interesante notar que los sistemas tipo N/N son muy sensibles al desplazamiento vertical, un desplazamiento de 0,1 mm respecto al centro puede causar una descompensación apreciable.

Para un sistema de "pick-up" en un solenoide finito que sufre esfuerzos mecánicos durante la medición, es necesario realizar ajustes adicionales del cero de la señal en ausencia de muestra. Con este objetivo también se utilizan N_1 y N_2 . En la Fig. 3(b) se muestra el puente de balance empleado, éste funciona como sigue: la señal proveniente del sistema de "pick-up" se compensa con dos señales, una en fase (tomada de N_2) y la otra obtenida por derivación que se obtiene de N_1 [7]. Esto permite mejorar en un orden (hasta 10^{-4}) la compensación del sistema.

Las señales primarias dM/dt y dH/dt son procesadas mediante derivación e integración analógica. En ocasiones es necesario amplificar la señal dM/dt , con este propósito utilizamos un preamplificador Textronik tipo L. A la salida de los integradores o el derivador las señales obtenidas serán proporcionales a $H(t)$, $M(t)$ o d^2M/dt^2 , respectivamente; éstas son almacenadas en un osciloscopio con memoria digital de dos canales (2048×8 Bit/canal) de la firma HAMEG modelo 205-3, éste posee salida para interface estándar IEEE-488. Además, pueden ser transferidas a una computadora personal IBM-XT SAMSUNG donde se dispone de un *software* de aplicación desarrollado por los autores. Este último permite realizar la composición xy de las señales en memoria.

3. DETERMINACIÓN DE H_a MEDIANTE LA TÉCNICA DEL "SINGULAR POINT DETECTION" (SPD)

3.1. La técnica del "singular point detection": principio físico

La determinación de H_a mediante la técnica del "singular point detection" (SPD) fue propuesta por Asti y Rinaldi en 1972 [8,9]; ilustremos su principio tomando el ejemplo que se presenta en la Fig. 1(a). La Fig. 1(b), muestra la discontinuidad para $H = H_a$ de la curva dM/dH vs. H perpendicular al eje fácil; esto conlleva a la aparición de una singularidad en la curva d^2M/dH^2 vs. H , según aparece en la Fig. 1(c).

El método esbozado es particularmente apropiado para la determinación de H_a en materiales policristalinos. Asti y Rinaldi demostraron [2] que, dependiendo de la simetría del eje difícil de magnetización, aparece una singularidad para $H = H_a$ en una de las derivadas de orden superior $d^{n^*}M/dH^{n^*}$ ($n^* \geq 2$). La forma de esta singularidad es

dada por

$$\langle m(\tau) \rangle = W_\sigma c(n) f(\tau) + r_n, \quad (4)$$

donde

$$f(\tau) = \left[\frac{1}{2} (|\tau| - \tau) \right]^s. \quad (5)$$

En estas expresiones $\tau = (H - H_a)/H_a$ es el campo magnético reducido, s es un número que depende de la simetría, $m(\tau)$ la magnetización reducida, $c(n = K_2/K_1)$ la función de amplitud y W_σ es la función de distribución de las cristalitas. Las funciones $f(\tau)$ y $c(n)$ están determinadas por la simetría del eje difícil.

Estas conclusiones teóricas fueron experimentalmente demostradas en muestras policristalinas isotrópicas de la ferrita hexagonal de bario, $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ [2,8,9]. La posibilidad de medir con una técnica de campo pulsado las derivadas de M es sólo una cuestión de buena relación señal-ruido. La amplitud del pico de anisotropía que muestra un material es proporcional a $w^2(H_{\text{max}}^2 - H_a^2)$, para $n^* = 2$; ($w \sim 2\pi/T$), desde el punto de vista experimental esto impone: a) la utilización de pulsos de corta duración (es importante señalar que para evitar otros efectos no deseables su duración debe ser del orden de los ms [11]); y b) la necesidad de aplicar valores pico de campo superiores a H_a (un buen criterio práctico es que el campo aplicado sea alrededor de un 30% mayor).

Para un material isótropo a la singularidad sólo contribuyen aquellas cristalitas cuyos ejes fáciles son perpendiculares a H_{ext} ; por eso con frecuencia se afirma que la técnica del SPD es selectiva. Es obvio que para una mejor observación de la singularidad es conveniente utilizar pequeños monocristales o policristales orientados (sinterizados o en forma de polvos).

3.2. Determinación de H_a en ferritas hexagonales y compuestos intermetálicos

Todas las mediciones que se presentan en este epígrafe se realizaron a temperatura ambiente en muestras de forma esférica. Luego, H_a se determina de la expresión $H_a = H_{\text{aext}} - (4\pi/3)M_s$.

En la Fig. 4(a) aparecen las curvas d^2M/dt^2 vs. t y $H_{\text{ext}}(t)$ para una muestra sinterizada isotrópica de $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$. La medición se efectuó con una forma de pulso de $1/2$ seno.

En mediciones SPD el $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ha sido rutinariamente empleado para la calibración del sistema en campo. El valor de H_a reportado para este material es de 17.0 ± 0.2 kOe [2]; esto permite calcular un campo de anisotropía externo de 18.4 kOe. Asumiendo estos datos se obtiene una constante de calibración de 224 Oe/mV.

La Fig. 4(b) presenta las señales correspondientes a un imán sinterizado anisótropo de $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$. La medición se efectuó en régimen de Crowbar y la muestra fue orientada con su eje fácil perpendicular a H_{ext} . Este material presenta un campo externo de anisotropía de 20.1 kOe; efectuando las correcciones correspondientes queda $H_a = 18.4$ kOe, lo que está en magnífica concordancia con el valor de 18.8 kOe reportado en la literatura [10].

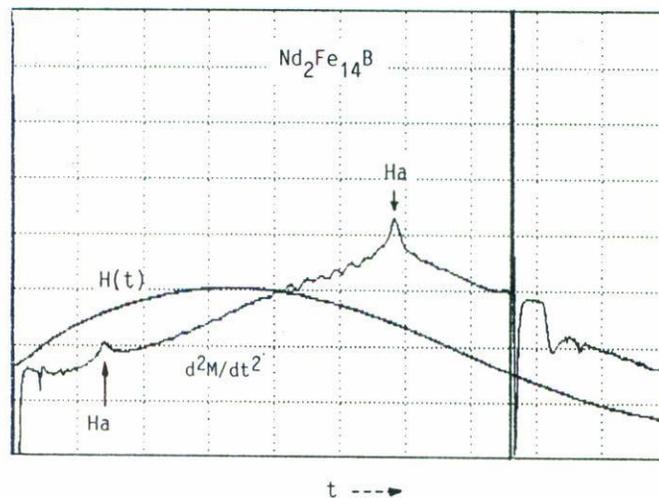


FIGURA 6. d^2M/dt^2 y $H_{\text{ext}}(t)$ para un policristal anisótropo sinterizado de $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. El campo de anisotropía es de 75 kOe.

En la Fig. 6 aparece el registro efectuado con $H(t)$ en forma de $1/2$ seno para un imán anisótropo de $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. El campo de anisotropía medido fue de $H_a = 75$ kOe, lo que está también en magnífico acuerdo con lo reportado para este material [1].

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se describe el magnetómetro de pulsos que se ha puesto en funcionamiento en la Universidad de La Habana. Se ha diseñado y construido una bobina de campo que trabajando a temperatura ambiente permite obtener con repetibilidad y sin deterioro sensible campos pulsados con valores pico de hasta 200 kOe para una tensión de carga moderada. Si se desarrolla una bobina de campo con resistencia mecánica apropiada y se refrigera en nitrógeno líquido, nuestra instalación debe permitir sin dificultad la generación de campos entre los 250–350 kOe.

Se efectuaron mediciones de campo de anisotropía en muestras policristalinas isotropas y anisotropas de ferritas hexagonales y compuestos intermetálicos a temperatura ambiente; los valores obtenidos para H_a están en magnífica concordancia con lo reportado por la literatura para estos materiales. En estos momentos, los esfuerzos se encaminan hacia: a) dotar a la instalación de un sistema criogénico que permita realizar mediciones entre 77 K y 300 K y b) hacer programable la fuente de pulsos. Se realizan esfuerzos también por realizar los arreglos experimentales necesarios para efectuar mediciones de M_s e iH_c en materiales con elevada anisotropía magnetocristalina. Los resultados serán posteriormente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen especialmente al Dr. Roland Grossinger del Instituto de Física

Experimental de la TU de Viena, Austria, por sus valiosas observaciones y recomendaciones. Se agradece también a los Drs. F. Bolzoni y E. Melioli, del Instituto MASPEC del CNR, Parma, Italia, y al Dr. C. Monet del LURE, Université Paris-Sud, Francia, por sus sugerencias y contribuciones durante el inicio de este proyecto.

REFERENCIAS

1. R. Grossinger, *Proc. of the Int. Works on Magn., Magn. Mater and Their Appl.*, La Habana, Cuba (mayo 21-29, 1991), Ed. by F. Leccabue y J.L. Sánchez, IOP Publ. Co. (1992), p. 111.
2. G. Asti and S. Rinaldi, *J. Appl. Phys.* **45** (1974) 3600.
3. C. Presno, Trabajo de Diploma, Facultad de Física, Universidad de La Habana, Cuba (1992).
4. R. Grossinger, *J. Phys.* **D15** (1982) 1545.
5. R. Gersdorf, F.A. Muller and L.W. Roeland, *Rev. Sci. Instr.* **36** (1965) 1100.
6. R. Grossinger, M. Katter, G. Badurek and R. Krewenka, pre-print, (1991).
7. Y. Alain, J. de Gunzbourg, J.P. Krebs and Miedan-Gros, *Rev. Sci. Instr.* **39** (1968) 1360.
8. G. Asti and S. Rinaldi, *Phys. Rev. Letters*, **28** (1972) 1584.
9. G. Asti and S. Rinaldi, *Rapporto Interno* No. 8 (maggio, 1972) Laboratorio MASPEC del CNR, Parma, Italia.
10. H. Kojima, in "Ferromagnetic Materials" Cap. 5, Ed. by E.P. Wohlfarth, North-Holland Publ. Co. (1982).
11. R. Grossinger, *Proc. of the VI Int. Works. on RE-Co Permanent Magnets and their Appl.*, Baden, Vienna, Austria (August 31-Sept. 3, 1982) p. 305.