

# Materiales Magnéticos: Principios y Aplicaciones

Dr. Marcos I. Oliva y Dra. Silvia E. Urreta

11 de febrero de 2008

## **Introducción**

Cómo es un material magnético? Ecuaciones de Maxwell. Magnitudes magnéticas fundamentales y magnitudes magnéticas de interés práctico. Unidades. Interacciones magnéticas. Microestructuras magnéticas. Dominios. Partículas pequeñas. Materiales magnéticos duros, blandos y ultra-blandos.

## **Diamagnetismo y paramagnetismo**

Momentos de átomos e iones: momentos de iones 3d y 4f, reglas de Hund. Efecto del campo cristalino, complejos octaédricos, tetraédricos y planos. Paramagnetismo, función de Brillouin. Susceptibilidad de un paramagneto, ley de Curie. Límite clásico, función de Langevin, ejemplos.

## **Interacción de intercambio y orden magnético**

Superposición de orbitales de átomos hidrogenoides vecinos, asimetría de los estados cuánticos electrónicos. Intercambio directo. Teoría del campo molecular. Ferromagnetismo, ley de Curie-Weiss, dependencia de la magnetización con la temperatura. Antiferromagnetismo, casos de dos subredes. Temperaturas características, ejemplos. Ferrimagnetismo, óxidos de metales de transición. Puntos de compensación. Garnets de metales de transición y tierras raras. Expresiones empíricas para  $M(T)$ . Comparación de la energía de intercambio con la interacción dipolar.

## **Otras interacciones**

Orbitales atómicos y moleculares. Estados ligantes y antiligantes. Superintercambio, ejemplos:  $MnO$ ,  $Fe_3O_4$ . Espinelas  $M_2+Fe_2O_4$  ( $M= Cu, Ni, Co, Fe, Mn$ ). Doble intercambio, manganitas. Intercambio en metales, electrones itinerantes. Curva de Slater-Pauling. Elementos de transición con diferente llenado de la banda 3d. Curva de Bethe-Slater. Modelo de bandas rígidas. Ferromagnetos débiles y fuertes. Intercambio indirecto en metales: RKKY. Caso de átomos magnéticos diluidos. Oscilaciones de Friedel y acoplamiento RKKY. Vidrios de spin, vidrios de clusters de spin, acoplamientos en multicapas.

## **Histéresis magnética**

Tipos de histéresis. Histéresis independiente del tiempo. Fenómenos dependientes del tiempo. Corrientes parásitas y pérdidas magnéticas. Relajación térmicamente activada. Reptación. Viscosidad magnética.

## **Energía libre magnética**

Términos de la energía libre. Breve introducción a sus diferentes contribuciones. Anisotropía, Anisotropía en metales y aislantes, Magnetostricción en metales y aislantes. Anisotropía magneto elástica. Influencia de las tensiones sobre la magnetización. Energía dipolar. Energía de intercambio. Energía en un campo externo. Dominios y paredes de dominios magnéticos. Espesor y densidad de energía de paredes de dominio de Bloch y de paredes de Néel. Dominios de clausura. Dominios en films delgados. Partículas finas mono-dominio. Superparamagnetismo. Microestructura atómica y microestructura magnética.

## **Anisotropía magnetocristalina**

Efectos de los acoplamientos spin-órbita y con el campo cristalino. Diferentes simetrías: cúbica, tetragonal, exagonal, etc. Expresiones fenomenológicas. Curvas de energía constante. Ejemplos: Fe, Co, Ni, magnetita. Medidas en monocristales. Ejes fáciles y duros. Campo de anisotropía. Anisotropías de superficie e interfaz.

### **Partículas pequeñas monodominio**

Partícula anisotrópica en presencia de un campo externo, modelo de Stoner-Wohlfarth. Frecuencia de salto y tiempo de relajación. Contribución superficial a la anisotropía de partículas nanométricas. Viscosidad magnética de un sistema de partículas. Regímenes bloqueado y superparamagnético para diferentes técnicas de observación. Ejemplos: del comportamiento de sistemas de partículas de hematita; comportamiento superparamagnético de una aleación CoCu.

### **Energía magnetostática (EM) y dominios magnéticos.**

Determinación de EM a partir de la distribución de magnetización en un cuerpo. Solución de las ecuaciones de Maxwell, aplicación a: esferas, cilindros y elipsoides. Dependencia de EM con el número de dominios. Extensión a cuerpos con superficies no cuadráticas. Campo y factor demagnetizantes, campo efectivo, ejemplos. Anisotropía de forma. Paredes de dominio, energía de pared. Ancho de pared de equilibrio. Número de dominios en equilibrio y tamaño característico. Técnicas de observación de dominios: Bitter, efecto Kerr (microscopía y MOKE), dispositivos de almacenamiento magneto-óptico de datos. Observación de dominios por efecto Faraday, microscopía TEM Lorentz, microscopía SEM, y SEM con análisis de polarización (SEMPA), microscopía de fuerza magnética, topografía por difracción de RX y neutrones. Comparación de escalas de medición de los diferentes métodos.

### **Magnetostricción y energía magnetoelástica**

Definiciones. Expresiones fenomenológicas de la magnetostricción para diferentes simetrías. Acoplamiento de la magnetostricción con la magnetización. Efectos mecánicos sobre la magnetización, energía magnetoelástica. Generalización de la anisotropía: magnetocristalina, magnetostática o de forma, magnetoelástica, etc. Sensores magnetoelásticos microcompuestos bi y tricapa basados en aleaciones amorfas. Aplicaciones.

### **Procesos de magnetización**

Aproximación de campo aplicado cuasi-estático. Rotación reversible. Rotación homogénea irreversible. Modos de rotación no homogéneos. Movimiento de paredes de dominio. Nucleación y expansión de dominios inversos. Ondas de spin en ferromagnetos. Mecanismos de coercitividad.

### **Materiales magnéticos blandos.**

Comportamiento ferromagnético blando de aleaciones Si-Fe, Fe-Ni, Fe-Co y de ferrites blandas, amorfos y aleaciones nanocristalinas. Permeabilidad, rotación irreversible AC, profundidad de skin, Aplicaciones: pérdidas por histéresis y corrientes parásitas. Resonancia ferromagnética.

### **Magnetismo en materiales magnéticos nanocristalinos y amorfos**

Sólidos amorfos. Interacciones competitivas. Fluctuaciones de intercambio. Anisotropía local aleatoria. Modelos de magnetismo en amorfos. Sistemas granulares nanocristalinos. Fluctuaciones de intercambio. Efectos de la anisotropía aleatoria sobre las propiedades. Escalas de longitud características. Mecanismos de coercitividad.

### **Materiales magnéticos duros**

M-H, B-H, (B-H)<sub>max</sub>, Partículas finas. Nucleación vs. Pinning. Materiales modelos: Alnico, Ferrita de Ba, Co-RE, Fe-RE-B.

### **Magnetismo en superficies y películas delgadas**

Estructura electrónica en la superficie y magnetismo. Momentos superficiales. Fases metastables. Misfit strain. Crecimiento epitaxial, Anisotropía magnética superficial y magnetostricción, Dominios. Dispositivos.

### **Problemas**

### **Laboratorios**

Lazos de histéresis (M-H) usando Vibrating Sample Magnetometer (VSM).

Mecanismos de relajación térmica: determinación de campos medios de fluctuaciones y de volúmenes de activación.

## **1 Metodología de trabajo**

La planificación del curso contempla el dictado de clases teóricas, donde se introducen y discuten los contenidos, clases prácticas grupales de resolución de problemas y el desarrollo de al menos dos trabajos experimentales sobre temas del curso.

## **2 Requisitos y procedimiento de evaluación**

Se requiere de los alumnos conocimientos previos de electricidad y magnetismo - en un nivel de Física General - y conocimientos elementales de estructura atómica. La evaluación final del curso se llevará a cabo mediante un examen escrito, en el cual los alumnos deberán resolver problemas integradores.

## **3 Carga horaria**

La carga horaria del curso es de 60 hs. Se dictarán 40 hs. de teóricos y 20 hs de trabajos prácticos.

## **Bibliografía**

1. Hysteresis in magnetism. Giorgio Bertotti, Academic Press. San Diego 1998.
2. Introduction to amorphous magnets ; Takahito Kaneyosi. World Scientific Publishing Co. Singapore 1992.
3. Modern Magnetic Materials. Principles and Applications. Robert C.; O'Handley. John Wiley and Sons, Inc. New York, 2000.
4. Introduction to Magnetic Materials B.D. Cullity, (Massachusetts, Addison-Wesley, 1972).
5. Introduction to the Theory of Ferromagnetism, Amikam Aharoni, Oxford Science Publications, 1998.
6. Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, David Jiles, Chapman and Hall 1996.
7. Artículos y Notas seleccionados por los profesores.