



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Espintrónica: Dinámica de espines en la red
cristalina y fases magnéticas en ortoferritas

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Físico

PRESENTA:

Luis Ernesto Garduño Garrido

TUTORA

Rebeca Díaz Pardo



«Cita. AA
AA
AA.»

Autor

Agradecimientos

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Donec odio elit, dictum in, hendrerit sit amet, egestas sed, leo. Praesent feugiat sapien aliquet odio. Integer vitae justo. Aliquam vestibulum fringilla lorem. Sed neque lectus, consectetur at, consectetur sed, eleifend ac, lectus. Nulla facilisi. Pellentesque eget lectus. Proin eu metus. Sed porttitor. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse eu lectus. Ut mi mi, lacinia sit amet, placerat et, mollis vitae, dui. Sed ante tellus, tristique ut, iaculis eu, malesuada ac, dui. Mauris nibh leo, facilisis non, adipiscing quis, ultrices a, dui.

Morbi luctus, wisi viverra faucibus pretium, nibh est placerat odio, nec commodo wisi enim eget quam. Quisque libero justo, consectetur a, feugiat vitae, porttitor eu, libero. Suspendisse sed mauris vitae elit sollicitudin malesuada. Maecenas ultricies eros sit amet ante. Ut venenatis velit. Maecenas sed mi eget dui varius euismod. Phasellus aliquet volutpat odio. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Pellentesque sit amet pede ac sem eleifend consectetur. Nullam elementum, urna vel imperdiet sodales, elit ipsum pharetra ligula, ac pretium ante justo a nulla. Curabitur tristique arcu eu metus. Vestibulum lectus. Proin mauris. Proin eu nunc eu urna hendrerit faucibus. Aliquam auctor, pede consequat laoreet varius, eros tellus scelerisque quam, pellentesque hendrerit ipsum dolor sed augue. Nulla nec lacus.

Índice general

Agradecimientos	v
1. Resumen	1
2. Introducción	3
3. Estado del Arte	5
3.1. Materiales Magnéticos y sus Propiedades	5
3.1.1. Magnetización	5
3.1.2. Susceptibilidad Magnética	5
3.1.3. Tipos de Materiales Magnéticos	6
3.1.4. Histéresis	6
3.2. Ortoferritas de Tierras Raras	6
3.2.1. Propiedades Magnéticas	6
3.2.2. Aplicaciones	6
4. Metodología	7
4.1. Síntesis	7
4.1.1. Sonicación	7
4.2. Caracterización	7
4.2.1. Análisis Termogravimétrico	7
4.2.2. Difracción de Rayos X	7
4.2.3. Microscopía Electrónica de Barrido	7
4.2.4. Espectroscopía UV-Vis	7
4.2.5. Magnetometría	7
5. Resultados	9
5.1. Muestras Sintetizadas	9
5.2. Caracterización	9
5.2.1. Análisis Termogravimétrico	9
5.2.2. Difracción de Rayos X	9
5.2.3. Microscopía Electrónica de Barrido	9
5.2.4. Espectroscopía UV-Vis	9
5.2.5. Magnetometría	9
6. Conclusión	11
7. Bibliografía	13

8. Anexos**15**

1 Resumen

2 Introducción

3 Estado del Arte

3.1. Materiales Magnéticos y sus Propiedades

Debido a que se busca caracterizar las propiedades magnéticas de los materiales de interés en esta tesis, es necesario puntualizar algunas características de interés.

3.1.1. Magnetización

La magnetización (M) de un volumen determinado se define como la suma de los momentos magnéticos contenidos dentro de éste. Representa la dirección y fuerza del campo magnético macroscópico resultante.

Ésta puede ser inducida por un campo magnético externo (H), como se explicará es el caso de los materiales para y diamagnéticos, o ser producto de un orden intrínseco de los átomos que forman el material, como es el caso de los ferro, antiferro y ferrimagnéticos. Sin embargo, incluso en este último caso, el campo magnético externo sigue teniendo efecto en la magnetización.

A excepción únicamente del diamagnetismo, los materiales magnéticos dependen de la alineación de sus momentos de espín, lo cual se traduce en una dependencia de la magnetización y la susceptibilidad magnética en la temperatura, debido a que el ordenamiento de los momentos se ve afectado por el movimiento causado por la temperatura [1].

3.1.2. Susceptibilidad Magnética

Esta propiedad es una medida de la respuesta de un material a un campo magnético externo. Es la capacidad de un material de ser magnetizado al ser expuesto a un campo externo [1].

La susceptibilidad (χ) para materiales lineales e anisótropos se expresa a través de un tensor de 3x3, cuyas componentes χ_{ii} describen la respuesta en cada eje principal, y las componentes χ_{ij} , $i \neq j$ los acoplamientos entre diferentes direcciones de la magnetización y el campo magnético externo. Es decir, de forma general:

$$\mathbf{M} = \chi \cdot \mathbf{H}$$

Si el material fuera además isótropo, esta relación se simplifica, debido a que ahora $\chi_{ij} = \delta_{ij}\chi$, con δ_{ij} una delta de Kronecker. Por lo cual, se reemplaza el tensor χ con un escalar χ :

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H} \iff \chi = \frac{M_i}{H_i}$$

Sin embargo, la relación entre la magnetización y el campo externo no siempre es lineal, sino que presenta comportamientos más complejos, lo cual da origen a fenómenos como la histéresis.

3.1.3. Tipos de Materiales Magnéticos

Clasificando a través de su respuesta a campos externos, podemos dividir los materiales en 5 tipos:

- **Diamagnéticos:** Cuando un material diamagnético es expuesto a un campo magnético externo, éste presenta una magnetización en el sentido opuesto, es decir, $\chi < 0$ [2].
- **Paramagnéticos:**
- **Ferromagnéticos:**
- **Antiferromagnéticos:**
- **Ferrimagnéticos:**

3.1.4. Histéresis

La histéresis

3.2. Ortoferritas de Tierras Raras

3.2.1. Propiedades Magnéticas

3.2.2. Aplicaciones

4 Metodología

4.1. Síntesis

4.1.1. Sonicación

4.2. Caracterización

4.2.1. Análisis Termogravimétrico

4.2.2. Difracción de Rayos X

4.2.2.1. Estructura Cristalina

4.2.2.2. Modelado de Picos de Difracción

4.2.2.2.1 Justificación Teórica

4.2.2.2.2 Factores de Bondad

4.2.2.3. Fórmula de Scherrer

4.2.3. Microscopía Electrónica de Barrido

4.2.3.1. Conceptos para el Análisis Estadístico

4.2.3.2. Morfología

4.2.3.3. EDS

4.2.4. Espectroscopía UV-Vis

4.2.4.1. Método Tauc

4.2.5. Magnetometría

4.2.5.1. Dispositivo Superconductor de Interferencia Cuántica

4.2.5.1.1 *Zero Field Cooling* y *Field Cooling*

4.2.5.1.2 Mediciones Magnéticas Realizadas

5 Resultados

5.1. Muestras Sintetizadas

5.2. Caracterización

5.2.1. Análisis Termogravimétrico

5.2.2. Difracción de Rayos X

5.2.3. Microscopía Electrónica de Barrido

5.2.3.1. Morfología

5.2.3.2. EDS

5.2.4. Espectroscopía UV-Vis

5.2.5. Magnetometría

5.2.5.1. Dispositivo Superconductor de Interferencia Cuántica

5.2.5.1.1 M vs T

5.2.5.1.2 χ vs T

5.2.5.1.3 M v H

6 Conclusión

7 Bibliografía

8 Anexos