



# Síntesis de películas delgadas ferromagnéticas de Ge(001)/Mn<sub>5</sub>Ge<sub>3</sub> utilizando la técnica de erosión catódica

Adriana Alvidrez Lechuga, Trinidad Holguín Momaca, Sion F. Olive Méndez.

Centro de Investigación en Materiales Avanzados S. C.

## Introducción

La *espintrónica* aprovecha la carga y el espín del electrón para crear nuevos dispositivos electrónicos con mayor velocidad de procesamiento de datos, mayor densidad de integración y menor consumo energético. El Mn<sub>5</sub>Ge<sub>3</sub> es un compuesto ferromagnético con una temperatura de Curie de 296 K y alta polarización de espín [1-4]. Este compuesto se ha sintetizado en forma de película epitaxial mediante la técnica *Molecular Beam Epitaxy*, mediante el proceso *Solid Phase Epitaxy* sobre sustratos de Ge(111) [5,6]. Sin embargo, para incorporarlo en la tecnología del silicio (CMOS), es necesario encontrar las condiciones necesarias para su crecimiento sobre Ge(001).

### Objetivos:

- Estudiar las condiciones para la elaboración de películas de Mn<sub>5</sub>Ge<sub>3</sub> sobre Ge(001) mediante la técnica de erosión catódica y co-deposito de Mn y Ge a diferentes temperaturas.
- Incrementar la temperatura de Curie del compuesto.
- Identificar la orientación del eje de fácil magnetización en función del espesor.

## Metodología

- Ajuste de la presión de operación del sputtering a 3mTorr.
- Limpieza del sustrato con plasma a 40W, 20min y temperatura ambiente.
- Observar condiciones de limpieza y co-deposito en la pantalla RHEED.
- Obtención de la reconstrucción después del recocido del sustrato a 750°C.
- Co-deposito de Mn y Ge en un rango de temperaturas de 250-550°C.
- Determinación de la potencia de flujos de Mn y Ge con el medidor de espesores.

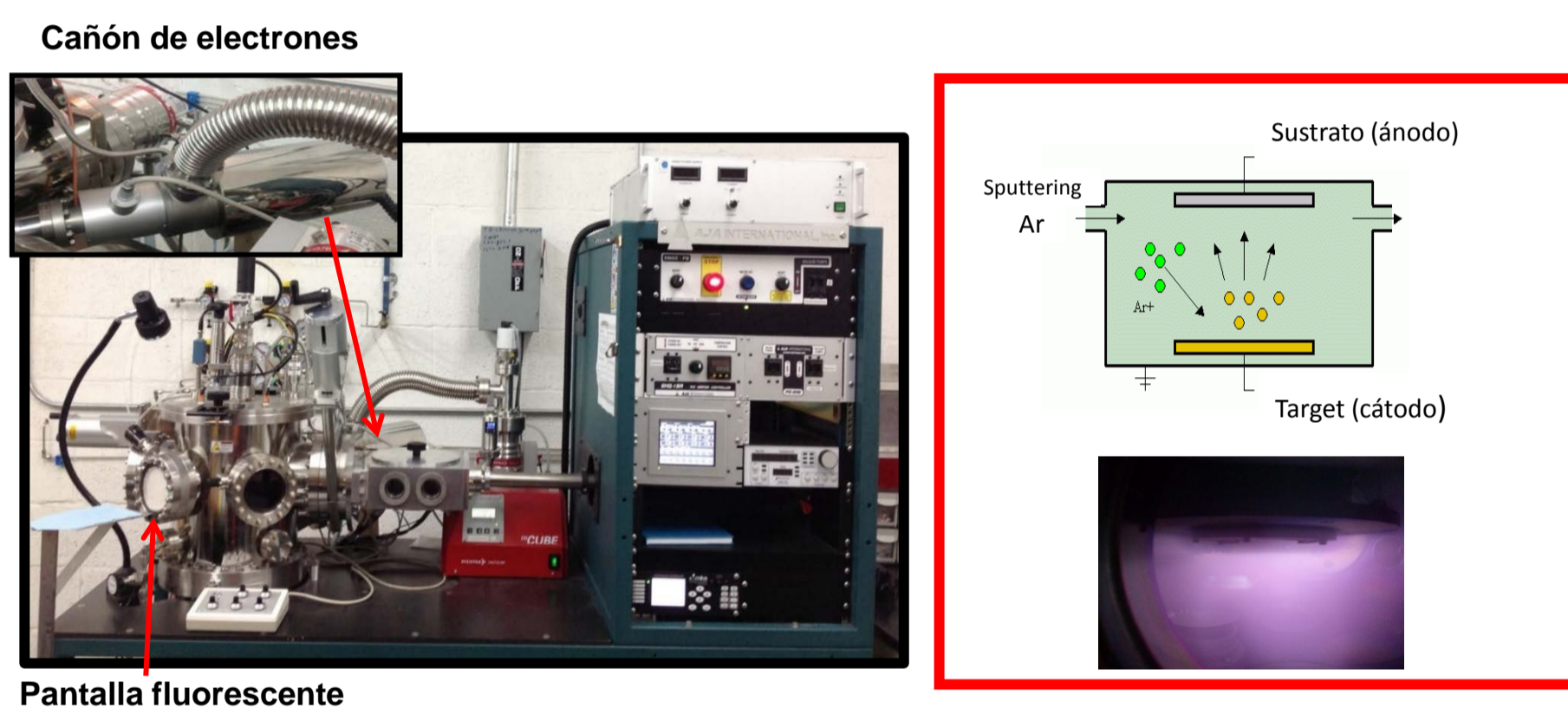


Fig. 1 Técnica de erosión catódica para la obtención de películas delgadas.

## Resultados

### Caracterización en DRX y AFM

Se elaboraron dos muestras a 200 y 450°C, estas se identificaron como AA-16 y AA-41 respectivamente. En la muestra AA-41 existen dos picos intensos (002) y (004) los cuales confirman la obtención del Mn<sub>5</sub>Ge<sub>3</sub>. Por su parte las imágenes AFM revelan como el aumento de temperatura origina que los granos en la muestra 450°C empiezan a coalescer para formar aglomerados más homogéneos y con menor rugosidad.

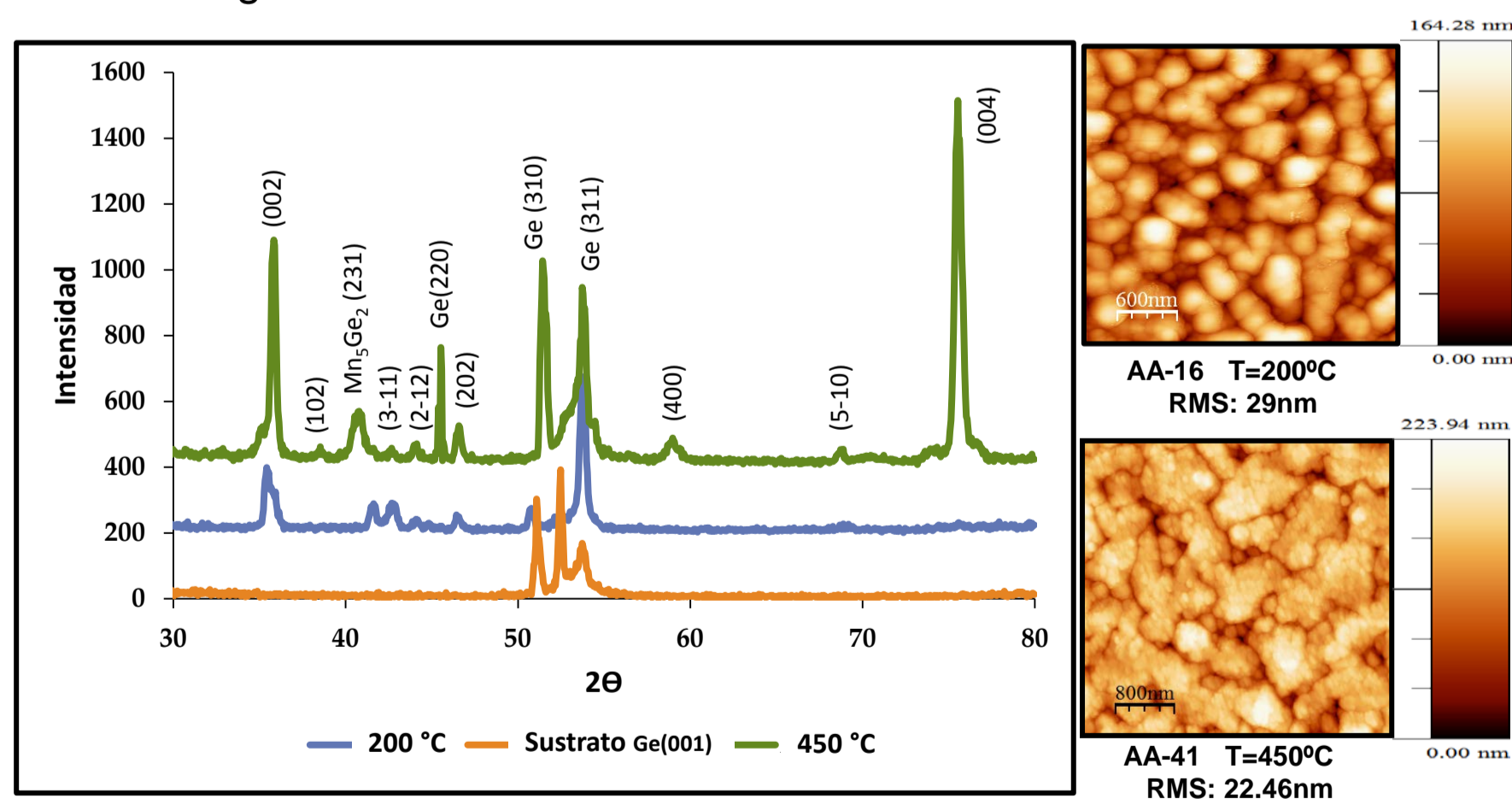


Fig. 2 Análisis de DRX y AFM de las muestras realizadas a 200 y 450°C.

### Análisis elemental por EDS de la muestra a 450°C

Los porcentajes atómicos resultantes del análisis elemental son muy próximos a los deseados para la obtención del Mn<sub>5</sub>Ge<sub>3</sub>, 50% -Mn y 30%-Ge.

Co-deposito a 450 °C	Composición %at.	
	Mn	Ge
Promedio	46.67±1.1	31±0.2

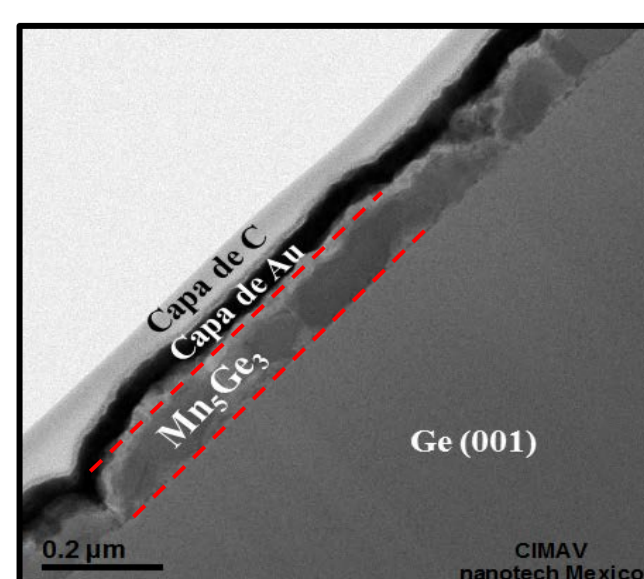


Fig. 3 Resultados del análisis elemental EDS.

## Análisis de la imagen de alta resolución (HRTEM)

Las imágenes muestran una interface relativamente abrupta entre el sustrato y la película, lo cual confirma que la etapa de limpieza y reconstrucción fue eficiente, permitiendo así el crecimiento de una película altamente cristalina, sin presencia de dislocaciones u otros defectos.

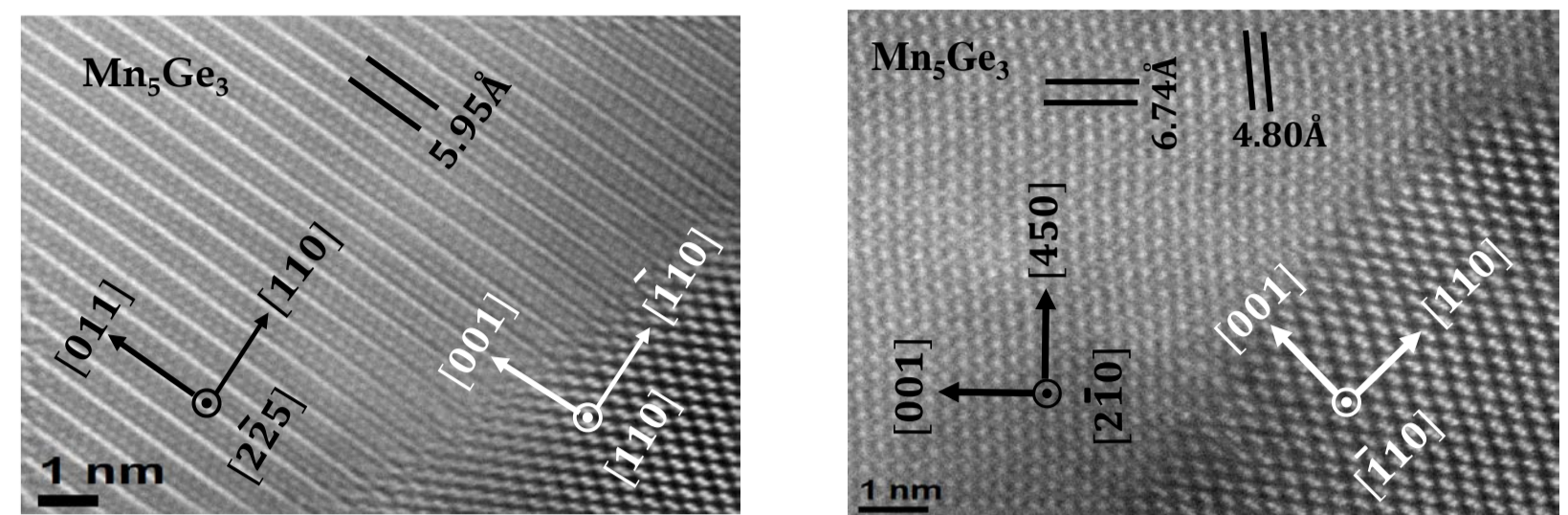


Fig. 4 Sección transversal en alta resolución de una película de Ge(001)/Mn<sub>5</sub>Ge<sub>3</sub>, con relación epitaxial [2-25]Mn<sub>5</sub>Ge<sub>3</sub>// [110]Ge y una segunda relación epitaxial encontrada [210]Mn<sub>5</sub>Ge<sub>3</sub>// [1-10]Ge.

## Simulación en el programa Carine del compuesto Mn<sub>5</sub>Ge<sub>3</sub>

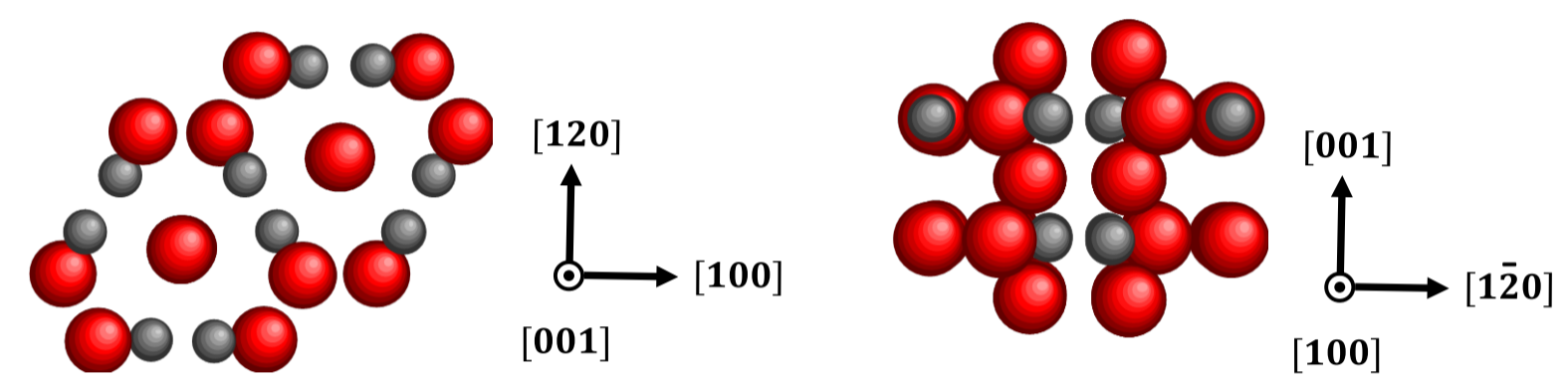


Fig. 5 Vista superior (izq.) y vista lateral del compuesto Mn<sub>5</sub>Ge<sub>3</sub>, (der.)

## Análisis elemental EDS de la muestras a 550 y 250°C

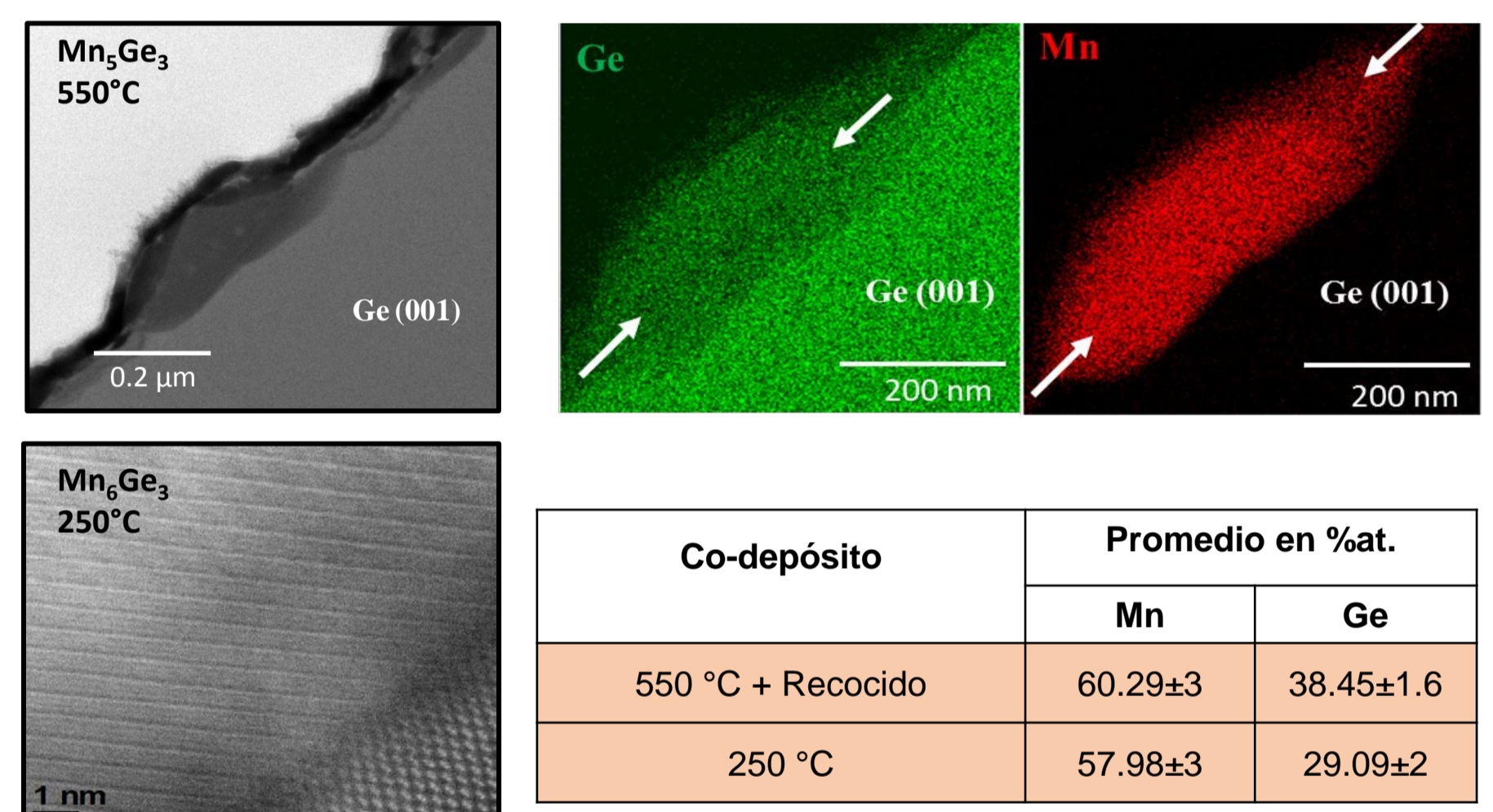


Fig. 6 Mapeo EDS realizado a la muestra de 550°C y análisis elemental de la muestra a 250°C

## Medición de propiedades magnéticas (PPMS)

La muestra a 250°C muestra un comportamiento ferromagnético, lo cual confirma los resultados del análisis EDS que corresponden al compuesto Mn<sub>5</sub>Ge<sub>3</sub>. Las muestras a 350, 450 y 550°C presentan antiferromagnetismo característico del Mn<sub>11</sub>Ge<sub>8</sub>.

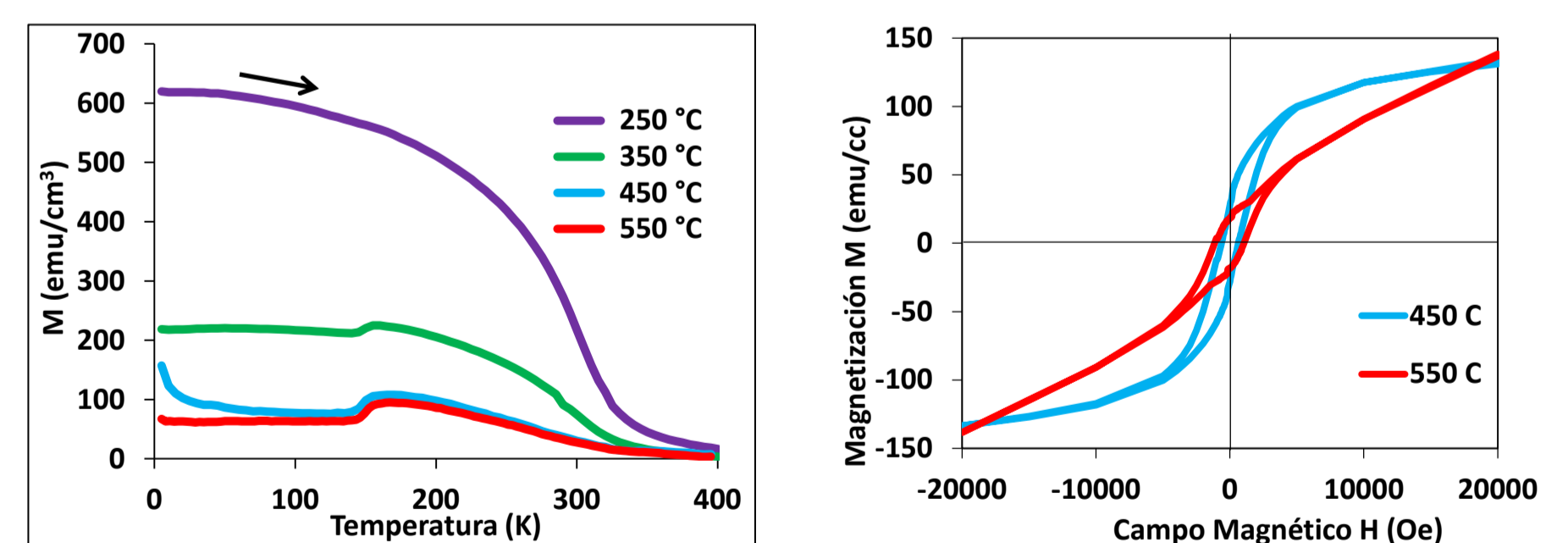
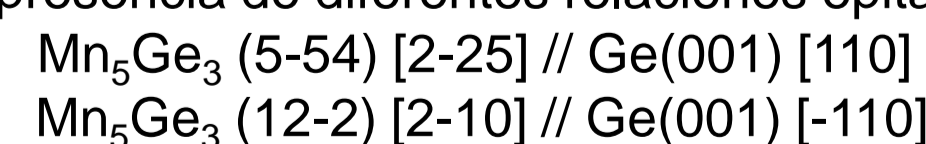


Fig. 7 Gráfica de M vs T (izq.) y gráfica de M vs H de la muestra a 450 y 550°C (der.)

## Conclusiones

Se obtuvieron películas continuas de Ge(001)/Mn<sub>5</sub>Ge<sub>3</sub> mediante la técnica de erosión catódica (sputtering), en un rango de temperatura entre 250-550°C; la temperatura fue la principal responsables del crecimiento del tamaño de grano, así como de propiciar la reacción entre el Mn y el Ge.

La caracterización de las películas delgadas se realizó mediante diferentes técnicas, con las cuales se estudió el crecimiento cristalino y las propiedades magnéticas del Mn<sub>5</sub>Ge<sub>3</sub>, se encontró la presencia de diferentes relaciones epitaxiales del Mn<sub>5</sub>Ge<sub>3</sub>:



El estudio de las propiedades magnéticas reveló la obtención de películas ferromagnéticas, principalmente a bajas temperaturas.

## Referencias

- [1] Dang Duc Dung, Dorj Odkhuu, Le Thanh Vinh, Soon Cheol Hong, and Sunglae Cho. *Appl. Phys.* 114, 073906 (2013).
- [2] N. Stojilovic, S. V. Dordevic, Rongwei Hu, and C. Petrovic. *Appl. Phys.* 114, 053708 (2013).
- [3] H. K. Yuan, H. Chen, A. L. Kuang, C. L. Tian, and J. Z. Wang. *Chem. Phys.* 139, 204307 (2013).
- [4] A. Spiesser, F. Viro, L.-A. Michez, R. Hayn, S. Bertaina, L. Favre, M. Petit, and V. Le Thanh. *Phys. Rev. B* 86, 035211 (2012).
- [5] A. Spiesser, S.F. Olive-Mendez, M.-T. Dau, L.A. Michez, A. Watanabe, V. Le Thanh, A. Glachant, J. Derrien, A. Barski, M. Jamet. *Thin Solid Films* 518, S113-S117 (2010).