

Modelo de multicapas $Gd_{1-x}Co_x/Co$ y la dependencia de su comportamiento con la variación del espesor de la capa ferromagnética $Gd_{1-x}Co_x$

N. Hurtado

Laboratorio de Física Teórica de Sólidos, CEFITEC,
Escuela de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela,
Caracas, 1041A, Venezuela

Recibido el 24 de noviembre de 2003; aceptado el 12 de octubre de 2004

Se hace un estudio numérico de los cambios en las propiedades magnéticas que se observan en el ordenamiento ferromagnético de multicapas $Gd_{1-x}Co_x/Co$. Se encuentra que los puntos de compensación presentan una disminución abrupta con el aumento de la capa ferromagnética ($Gd_{1-x}Co_x$). Se observa que a partir de un espesor de la capa ferromagnética, la temperatura de compensación se hace independiente del crecimiento de la capa, este resultado coincide con lo que algunos autores han encontrado experimentalmente. La temperatura crítica varía sólo para espesores pequeños de la capa $Gd_{1-x}Co_x$, este comportamiento es debido a efectos de tamaño finito, para los cuales la temperatura crítica es sensible. La magnetización total de las multicapas presenta un valor distinto de cero para un alto rango de temperatura, ya que la temperatura crítica del Gd es muy alta comparada con la del Co . La temperatura crítica se mantiene constante en el rango donde la temperatura de compensación existe.

Descriptor: Multicapas; Gd/Co; ising; ferromagnetismo; temperaturas de compensación.

A numerical study of the changes over magnetic properties observed in multilayers $Gd_{1-x}Co_x/Co$ have been done. It is found that the compensation temperature shows a abrupt decrease when the thickness of the ferrimagnetic layer ($Gd_{1-x}Co_x$) has been increased. It has been observed that after some value of the ferrimagnetic layer thickness, the compensation temperature becomes independent of the layer growing, as observed in experimental work. Due to finite size effects, the critical temperature is sensible to small variations of the thickness of the $Gd_{1-x}Co_x$ layer. The whole magnetization of the multilayers present a value different from zero for a wide range of temperature since the critical temperature of the Gd is very high compared with the one of the Co . The critical temperature is constant in the whole range where compensation temperature exists.

Keywords: Multilayers; Gd/Co; ising; ferrimagnetic; compensation temperature.

PACS: 75.50.Gg; 75.10.Dg; 75.30.Gw

1. Introducción

El acoplamiento antiferromagnético en la interface entre elementos de tierras raras pesadas (Gd) y metales de transición (Fe , Co) es de gran interés teórico y experimental, ya que produce cambios en las características propias de cada elemento, así como cambios en las propiedades colectivas del sistema. Las variaciones en las propiedades de la saturación de la magnetización y la presencia de temperaturas de compensación que se observan en el caso de multicapas construidas con Gd y Co [1–3], proporcionan un interés particular en el área de dispositivos magnetorresistivos y magnéticos, al igual que en el grabado y borrado magneto óptico [4].

Se ha encontrado experimentalmente que el acoplamiento entre los cristales Gd/Co es muy difícil de obtener [5] debido a la fuerte interdifusión entre las capas que toman lugar en el sistema, lo cual limita las posibles aplicaciones de estos sistemas ferromagnéticos artificiales. De igual forma se ha obtenido que la preparación de mezclas amorfas de $Gd_{1-x}Co_x$, produce una disminución tanto en la oxidación de la mezcla, así como en la velocidad de interdifusión en la interface [6]. Para explicar algunas características del ordenamiento ferromagnético de multicapas Gd/Co , se han propuesto y estudiado dos modelos; el modelo de mezcla parcial de capas y el modelo de interacción de intercambio no uni-

forme $Gd_{1-x}Co_x$, siendo este último el modelo que ha dado mejores resultados [2].

En la mezcla $Gd_{1-x}Co_x$, los espines de Gd se alinean antiparalelamente a los espines de Co , al igual que en la interface en las multicapas Gd/Co . El comportamiento macroscópico que se observa es el de un material ferromagnético, en el cual la temperatura de compensación disminuye abruptamente con el espesor de la mezcla como se observaba en el caso de las multicapas Gd/Co , sin embargo, el perfil magnético de $Gd_{1-x}Co_x$ es diferente al esperado para el caso ideal de Gd/Co .

En ambos casos ($Gd_{1-x}Co_x/Co$ y Gd/Co), la temperatura de compensación depende fuertemente del espesor de las capas. Estudios realizados con difracción de rayos X en multicapas Gd/Co indican un rápido cambio al estado amorfo en la interface, especialmente cuando el Co es depositado sobre el Gd [7].

El objetivo principal de este trabajo es hacer un estudio numérico, de la posible naturaleza del acoplamiento de intercapas Gd/Co . En particular se usará el modelo de interacción de intercambio no uniforme [2], construyendo multicapas con una mezcla amorfa $Gd_{1-x}Co_x/Co$. Se usa un modelo ferromagnético mixto de Ising con las subredes de espines S^{Gd} y S^{Co} intercaladas. Se determina el comportamiento de la temperatura crítica, T_c , la temperatura de compensación, T_{comp} ,

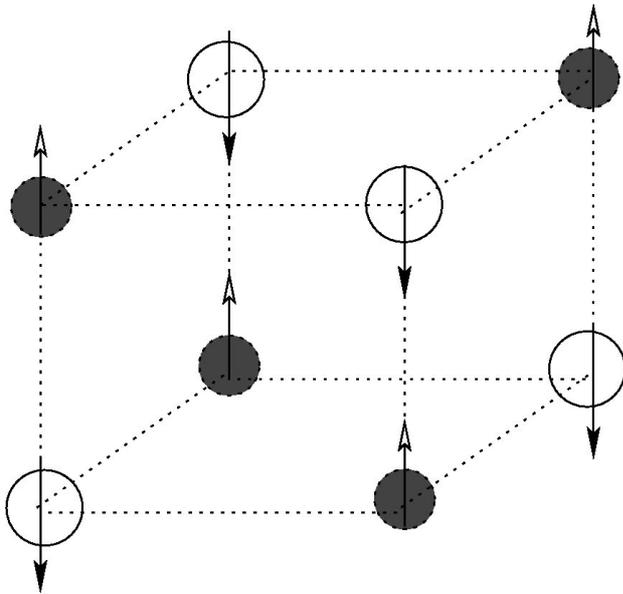


FIGURA 1. Celda unitaria del modelo ferrimagnético mixto de Ising en 3 dimensiones. Interacción ferromagnética entre espines S^{Gd} (círculos vacíos) y espines S^{Co} (círculos llenos).

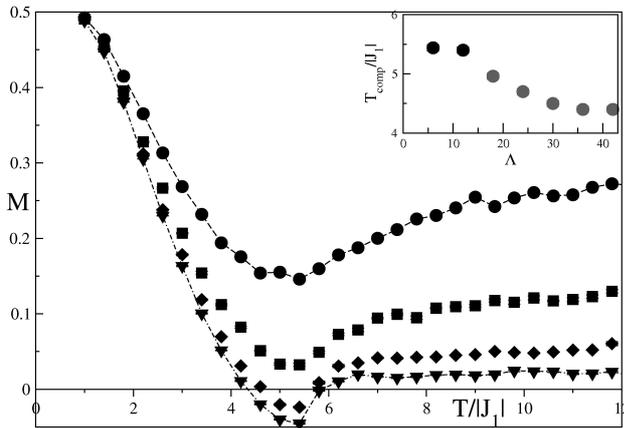


FIGURA 2. Magnetización total del sistema en función de la temperatura para $\Lambda = 6$ (círculos), $\Lambda = 12$ (cuadrados), $\Lambda = 24$ (diamantes), $\Lambda = 42$ (triángulos). En la parte superior se grafica la temperatura de compensación en función del espesor de la capa ferromagnética.

y la saturación de la magnetización, al aumentar el espesor de la multicapa ferromagnética $Gd_{1-x}Co_x$.

2. Modelo y método

El modelo consta de una subred cúbica-cara-centrada (fcc) de espines S^{Gd} que se intercala con otra subred fcc de espines S^{Co} , la interacción entre ambas subredes es antiferromagnética y forman finalmente una red cúbica mixta con ordenamiento ferromagnético, como se puede observar en la celda unitaria que se muestra en la Fig. 1. Esto se conoce como modelo ferromagnético mixto de Ising. Con este modelo se pretende representar el comportamiento de la interfaz entre el Gd y el Co , de tal manera de reproducir algunos

de los resultados observados experimentalmente en multicapas $Gd_{1-x}Co_x/Co$ [8]. Las condiciones de contorno son periódicas en todas las direcciones.

En trabajos posteriores se mostrarán los resultados correspondientes a colocar un cristal de Gd en una de las direcciones en las que crece la mezcla y Co en la otra. En ese caso se hará crecer el espesor de la mezcla para simular el crecimiento de la interfaz en multicapas Gd/Co .

Los valores reportados en la literatura correspondientes a estos elementos son [2, 9]: $S^{Gd} = 3,5$; $S^{Co} = 0,85$; $J^{Co-Co} > J^{Gd-Co}$ y $J^{Co-Co} \gg J^{Gd-Gd}$. Para obtener una mezcla amorfa ferromagnética de $Gd_{1-x}Co_x$ se ha encontrado que la concentración, x , de átomos de Co en la mezcla debe estar en el rango de $0,30 < x < 0,70$. En estas mezclas el campo cristalino interviene en la creación de una pared de Bloch en el plano interfacial de la transición.

Para la simulación se ha utilizado: $S^{Gd} = 0, \pm 3,5$ y $S^{Co} = 0, \pm 1$. la interacción de intercambio de los espines de Gd y Co los definimos como $J^{Co-Co} = 2J^{Gd-Co}$ y $J^{Gd-Gd} = 0$, se colocó una concentración de Co un poco mayor que la de Gd , $x = 0,55$. El factor de espesor de capa, Λ , define el incremento del espesor de la capa ferromagnética, $Lz = \Lambda$ y $\Lambda = 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42$. Las dimensiones lineales del plano que contiene a la capa son $Lx = Ly = 90$.

Se aplica un campo cristalino a toda la red para disminuir la estructura cristalina de la misma:

$$\mathcal{H} = - J^{Gd-Co} \sum_{\langle nn \rangle} S_i^{Gd} S_j^{Co} - J^{Co-Co} \sum_{\langle nmn \rangle} S_j^{Co} S_k^{Co} - D \left[\sum_i (S_i^{Gd})^2 + \sum_j (S_j^{Co})^2 \right]. \tag{1}$$

Utilizando el método de Monte Carlo y haciendo un barrido secuencial de la red, se calcularon las magnetizaciones por sitio de la subred de espines S^{Gd} , M^{Gd} , y de la subred de espines S^{Co} , M^{Co} ; la magnetización total por sitio, M y la susceptibilidad magnética, χ . Asimismo se calcularon la temperatura crítica, T_c , y la temperatura de compensación, T_{comp} , definida esta última como la temperatura a la cual las magnetizaciones de las subredes tienen igual magnitud $|M^{Gd}(T_{comp})| = |M^{Co}(T_{comp})|$ y signo opuesto, de tal forma que la magnetización total es cero a T_{comp} .

3. Resultados

En la Fig. 2 se muestra la saturación de la magnetización como función de la temperatura para diferentes espesores de la capa ferromagnética. Se observa que es posible mantener una magnetización distinta de cero para altos valores de temperatura, ya que la temperatura crítica del Gd es bastante alta comparada con la del Co , por lo que se observa un amplio margen de magnetización distinta de cero después de la temperatura de compensación. Dado que la relación entre Gd y Co se mantiene aproximadamente constante, podríamos esperar la misma magnetización a temperaturas por encima de

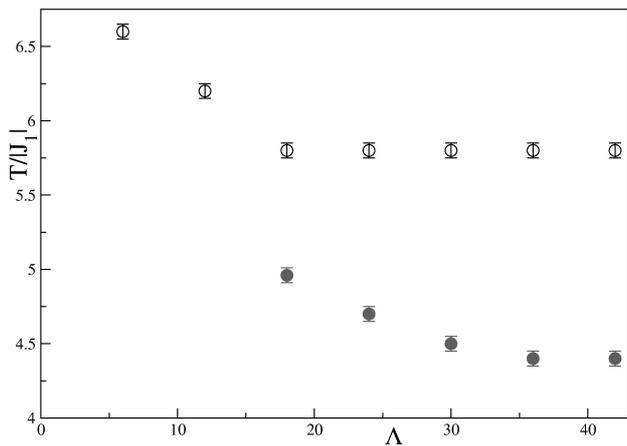


FIGURA 3. Temperatura de compensación (círculos llenos) y temperatura crítica (círculos vacíos) en función del espesor de la capa ferrimagnética $Gd_{1-x}Co_x$.

la temperatura de compensación, sin embargo esto no ocurre. Los resultados nos sugieren que problemas de interface que no han sido tomados en cuenta están ocurriendo, por lo que la magnetización de la subred de espines de Co disminuye con mayor velocidad que la de Gd a pesar de que su interacción a segundos vecinos es importante.

En la parte superior de la Fig. 2 se grafica la temperatura de compensación en función del espesor de la capa ferromagnética, $Gd_{1-x}Co_x$, en ella se observan tres comportamientos distintos. Primero, los dos puntos obtenidos para los espesores más pequeños, son los puntos para los cuales las magnetizaciones de las subredes se hacen lo más parecidas posibles, pero que no llegan a compensarse por lo que en realidad no son puntos de compensación, sin embargo, los hemos graficado, ya que muchos autores toman este valor experimental como temperatura de compensación [8]. Al incrementar el espesor de la capa, aparece una temperatura de compensación, la cual sufre una disminución abrupta con el aumento del espesor de la capa ferromagnética. Se observa un valor a partir del cual esta temperatura alcanza un valor constante y se hace independiente del incremento del espesor

de la capa. Esto significa que utilizando capas delgadas es posible aumentar el valor de la temperatura de compensación en ferromagnetos artificiales.

En la Fig. 3 se grafica la temperatura de compensación y la temperatura crítica en función del espesor de la capa ferromagnética. Observamos una variación fuerte en la temperatura crítica para los dos valores más pequeños de espesor de la capa, rango en el cual no se observan puntos de compensación. Al aumentar el espesor de la capa encontramos que en todo el rango donde se observan puntos de compensación la temperatura crítica se mantiene constante. Las variaciones del espesor de las capas producen cambios importantes en las propiedades del sistema magnético.

4. Conclusiones

Utilizando un modelo ferromagnético mixto de Ising, con las subredes de espines S^{Gd} y S^{Co} intercaladas y con condiciones de contorno mixta, se han reproducido numéricamente algunos de los cambios observados experimentalmente en el crecimiento de multicapas con ordenamiento ferromagnético $Gd_{1-x}Co_x/Co$.

El comportamiento de la saturación de la magnetización depende fuertemente del espesor de la capa ferromagnética. La temperatura de compensación cae abruptamente con el aumento del espesor de la capa $Gd_{1-x}Co_x$, hasta alcanzar un valor constante, a partir del cual T_{comp} se hace independiente del aumento del espesor de la capa. La temperatura crítica se mantiene constante, excepto cuando la capa es muy delgada debido a los efectos de tamaño finito.

Se encuentra que es posible aumentar la temperatura de compensación y la temperatura crítica controlando el espesor de las capas.

Agradecimientos

Al CDCH-UCV por el soporte financiero bajo el Proyecto Individual N° 03.11.5063.02

1. J. Colino, J.P. Andrés y J.M. Riveiro, *Phys. Rev. B* **60** (1999) 6678.
2. A.V. Svalov et al., *J. of All and Comp* **327** (2001) 5.
3. K. Takahashi, H. Fujimori y H. Kurokawa, *J. Magn. Magn. Mater.* **126** (1993) 242.
4. R.E. Camley y Stamps, *J. Phys. Cond. Mat.* **5** (1993) 3727.
5. J.A. González, J.P. Andrés, M.A. Arrang, M.A. López de la Torre y I.M. Riveiro, *J. Phys. Cond. Mat.* **14** (2002) 5061.
6. J. Colino, J.A. González, J.P. Andrés, M.A. López de la Torre y J.M. Riveiro, *App. Phys. A- Materials Science and Processing* **74** (2002) S1573.
7. G.A. Bertero, T.C. Hufnagel, B.M. Clemens y R. Sinclair, *J. Mater. Res.* **8** (1993) 771.
8. J.A. Alonso, R. Hojvat de Tendler, D.A. Barbiric y J.M. Rivero, *J. Phys. Cond. Mat.* **14** (2002) 8913.
9. R.E. Camley, *Phys. Rev. B* **39** (1989) 12316.