

교환결합Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe나노복합다층박막계의 자기적성질에 대한 미시자기학적연구

려혁수, 박학철, 최창호

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《정보기술, 나노기술, 생물공학을 비롯한 핵심기초기술과 새 재료기술, 새 에너지기 기술, 우주기술, 핵기술과 같은 중심적이고 견인력이 강한 과학기술분야를 주력격방향으로 정하고 힘을 집중하여야 합니다.》(《조선로동당 제7차대회에서 한 중앙위원회사업총화보고》 단행본 39페이지)

Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe나노복합체영구자석[1]은 Nd₂Fe₁₄B합금영구자석보다 희토류합금함량이 적고 높은 자기적성질 특히 높은 잔류자화와 자기에너지특성, 열 및 화학적안정성을 가지는것으로 하여 실천적으로 가치있는 자성재료로 주목되어왔다. 각이한 형태의 교환결합 Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe나노복합계의 자기적성질과 그 성질이 나타나게 되는 미시자기학적물림새를 해석하기 위한 이론[2] 및 실험적연구[3]들과 미시자기학적연구[4, 5]들에서는 자기적성질 특히 보자력이 연자성 α -Fe상층의 두께에 가장 민감하게 의존하며 경자성상과 연자성상층들사이의 상간교환결합특성에 관계된다고 해석하였다.

우리는 교환결합Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe나노복합다층박막계의 잔류자화, 보자력, 최대에너지적 등 자기적특성량들과 미시구조인자들(상층두께)사이관계를 미시자기학적유한요소모의로 평가하고 그 결과를 경자성Nd₂Fe₁₄B와 연자성 α -Fe사이의 상간교환결합효과의 견지에서 미시자기학적으로 해석하였다.

Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe나노복합다층박막계의 유한요소모형을 그림 1에 보여주었다.

그림 1에서 보는바와 같이 이 모형은 4개 층의 경자성Nd₂Fe₁₄B층(두께 $t_h=20\text{nm}$)과 연자성 α -Fe층(두께 $t_s=15\text{nm}$)이 서로 엇바뀌어 배치되어있다.

경자성Nd₂Fe₁₄B상과 연자성 α -Fe상의 체적분률은 다음과 같이 결정할수 있다.

$$v_h = \frac{t_h}{t_h + t_s}, \quad v_s = \frac{t_s}{t_h + t_s}$$

이로부터 전체 계의 유효포화자화세기는 다음과 같이 표시된다.

$$J_s^{\text{유효}} = J_s^h v_h + J_s^s v_s$$

여기서 J_s^h 와 J_s^s 는 각각 경자성Nd₂Fe₁₄B상과 연자성 α -Fe상의 포화자화세기이다.

론문에서는 경자성Nd₂Fe₁₄B층과 연자성 α -Fe층의 두께 t_h 와 t_s 를 5nm에서부터 50nm로 변화시키면서 자기적성질들을 평가하여 자기적성질의 미시구조의존성을 고찰하였다.

각이한 Nd₂Fe₁₄B층두께에서 α -Fe층의 두께에 따르는 잔류자속밀도와 고유보자력의

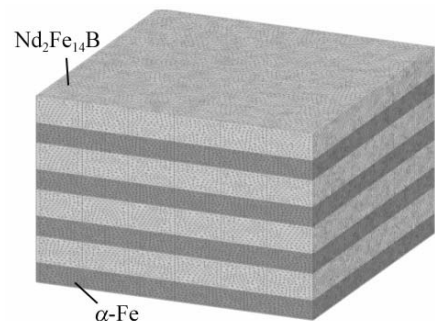


그림 1. Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe나노복합다층박막계의 유한요소모형

변화는 그림 2와 같다.

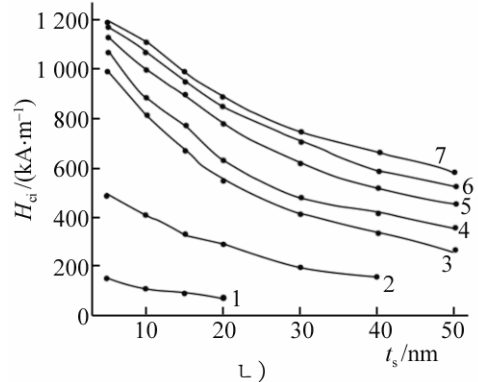
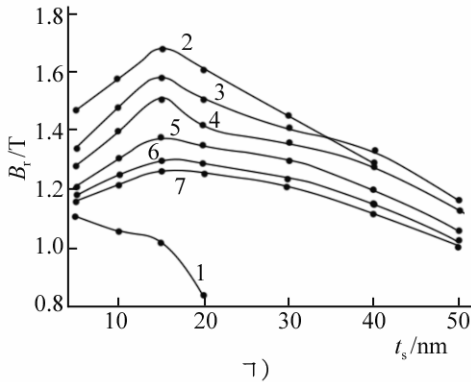


그림 2. 각이한 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 층두께에서 $\alpha\text{-Fe}$ 층두께에 따르는 잔류자속밀도(γ)와 고유보자력(ζ)의 변화
1-7은 t_h 가 각각 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50nm인 경우

그림 2에서 보는바와 같이 t_h 가 10nm이상일 때 잔류자속밀도는 t_s 가 증가함에 따라 처음에는 증가하다가 감소하며 $t_s=15\text{nm}$ 에서 최대값을 가진다. 즉 교환결합 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ 나노복합다층박막계에서 $t_h=10\text{nm}$ 이고 $t_s=15\text{nm}$ 일 때 최대잔류자속밀도는 $B_r \approx 1.68\text{T}$ 이다. 또한 고유보자력은 t_h 가 감소함에 따라 그리고 t_s 가 증가함에 따라 단조감소한다. t_s 가 20nm보다 작고 t_h 가 15nm보다 큰 경우 상대적으로 높은 보자력($H_{ci} > 800\text{kA/m}$)이 나타나며 $t_h=50\text{nm}$, $t_s=15\text{nm}$ 인 경우에 최대보자력은 $H_{ci} \approx 1190\text{kA/m}$ 이다.

이것은 유효이방성모형으로부터 얻은 고유보자력의 계산결과[4]와의 비교를 통하여 해석할 수 있다.(그림 3)

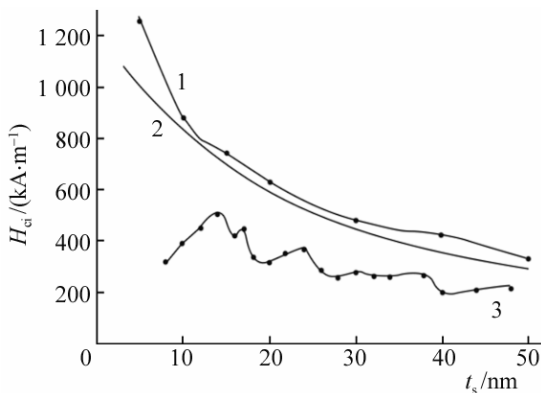


그림 3. 유한요소모의와 유효이방성모형[4]으로부터 얻은 고유보자력의 계산결과($t_h=10\text{nm}$)
1-유한요소모의, 2-유효이방성모형, 3-실험결과[3]

이한 공정오차에도 기인된다고 볼 수 있다.

각이한 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 층두께에서 $\alpha\text{-Fe}$ 층의 두께에 따르는 최대에너지적 (BH)_{최대}의 변화는 그림 4와 같다.

그림 4에서 보는바와 같이 t_s 가 20nm보다 작고 t_h 가 10nm보다 클 때 200kJ/m^3 이상의 비교적 높은 최대에너지적값이 얻어진다. 특히 $t_h=20\text{nm}$, $t_s=15\text{nm}$ 인 나노복합다층

그림 3에서 보는바와 같이 t_s 가 10nm이상에서부터 유한요소모의결과와 유효이방성모형의 해석결과는 거의 일치한다. 이것은 보자력에 대한 유한요소모의결과가 경자성상과 연자성상사이의 상간교환결합특성을 비교적 정확히 반영하고있다는것을 보여준다. 또한 선행실험결과[3]와 비교해볼 때 유한요소모의로부터 얻은 보자력결과는 높게 평가된다. 이것은 기본적으로 선행실험[3]에서 측정된 자성계가 $\alpha\text{-Fe}/\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ 3층박막계로서 유한요소모의모형과 구조적으로 차이나는데 원인이 있으며 실험적으로 제조한 나노구조의 균일성과 보자력측정에서의 측정오차 등 각

박막계모형(그림 1)에서 가장 높은 최대에너르기적값 $(BH)_{\text{최대}} = 301\text{kJ/m}^3$ 이 얻어진다.

이때 Nd₂Fe₁₄B의 체적분률은 $v_h = 57.1\%$, 잔류자기비는 $J_r/J_s = 0.818$, 잔류자속밀도는 $B_r = 1.51\text{T}$, 고유보자력은 $H_{ci} = 771\text{kA/m}$ 이다.

이러한 높은 자기적특성량들은 엇바뀌어 배치된 경자성Nd₂Fe₁₄B층들과 연자성 α -Fe층들사이의 효율적인 상간교환결합을 이룰수 있는 적합한 미시구조에서 나타난다.

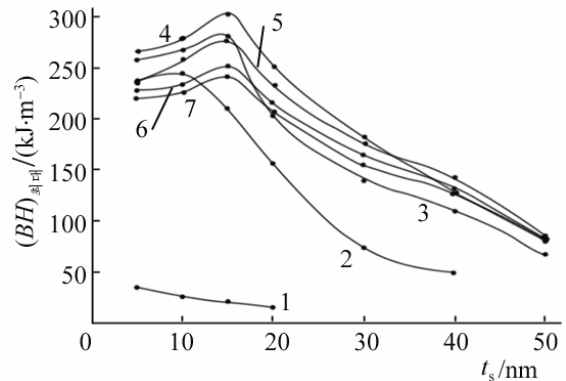


그림 4. 각이한 Nd₂Fe₁₄B층두께에서 α -Fe층의 두께에 따르는 최대에너르기적의 변화
1-7은 t_h 가 각각 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50nm인 경우

맺는 말

교환결합Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe나노복합다층박막계의 잔류자화, 보자력, 최대에너르기적 등 자기적특성량들과 미시구조인자들(상층두께)사이관계를 미시자기학적유한요소모의로 평가하고 그 결과를 경자성Nd₂Fe₁₄B와 연자성 α -Fe사이의 상간교환결합효과의 견지에서 미시자기학적으로 해석하였으며 가장 높은 자기적특성이 나타날수 있는 최적미시구조를 예측하였다.

참고 문헌

- [1] R. Coehoorn et al.; J. Magn. Magn. Mater., 80, 101, 1989.
- [2] E. F. Kneller et al.; IEEE Trans. Magn., 27, 3588, 1991.
- [3] S. M. Parhofer et al.; IEEE Trans. Magn., 32, 4437, 1996.
- [4] Y. Sun et al.; Solid State Commun., 141, 156, 2007.
- [5] N. M. Saiten et al.; J. Magn. Magn. Mater., 365, 45, 2014.

주체107(2018)년 9월 5일 원고접수

Micromagnetic Study on Magnetic Properties of Exchange Coupled Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe Nanocomposite Multilayer Systems

Ryo Hyok Su, Pak Hak Chol and Choe Chang Ho

We studied the magnetic properties of exchange coupled nanocomposite multilayer systems constructed alternately with hard magnetic Nd₂Fe₁₄B layers and soft magnetic α -Fe layers by micromagnetic finite element method(FEM).

Key words: nanocomposite permanent magnet, exchange coupling, micromagnetic finite element simulation