

이방성 자기저항측정을 이용한 NiO/NiFe 박막의 교환결합연구

김종기 · 김선옥 · 이기암

단국대학교 물리학과, 충남 천안시 안서동 산 29, 330-714

이상석* · 황도근

상지대학교 컴퓨터전자물리학과, 강원도 원주시 우산동, 220-702

(2002년 6월 11일 받음, 2002년 8월 20일 최종수정본 받음)

일축이방성을 부여한 NiO/NiFe 박막을 제작하고 이들의 강한 교환결합력과 약한 교환결합력의 분포에 대하여 조사하였다. 제작된 시편들의 교환결합력의 크기는 VSM 측정과 이방성자기저항측정을 통하여 확인하였으며, 회귀분석법을 통하여 두 교환결합력의 상호관계를 조사하였다. NiO(60 nm)/NiFe(10 nm) 시편의 경우 전체 교환결합력 중에서 차지하는 약한 교환결합력의 크기는 외부인가자장의 크기에 관계없이 일정한 비율($\alpha=0.2\sim 0.4$)을 나타내었고 이는 약한 교환결합을 하는 영역이 일정하게 존재함을 보여준다. 교환결합력의 크기가 서로 다른 시편의 경우는 교환결합력의 크기가 작을수록 전체 교환결합력 중에서 차지하는 약한 교환결합력의 크기가 컸으며, 교환결합력의 크기가 증가할수록 그 비율이 감소하였다. 이는 약한 교환결합을 하는 영역이 일정하게 존재한다고 가정할 경우 전체의 평균 교환결합력의 크기가 감소함에 따라 그 비율이 증가한 것으로 해석할 수 있다. 따라서 NiO/NiFe 박막에서 강한 교환결합을 하는 영역과 약한 교환결합을 하는 영역이 일정하게 존재함을 알 수 있다.

주제어 : 강한 교환결합력, 약한 교환결합력, 이방성자기저항

I. 서 론

NiO와 NiFe 이중구조에서 일어나는 교환결합의 근원 규명과 외부자장 변화에 따른 자성체 자구의 거동 메카니즘의 체계적인 관찰이 오래 전부터 꾸준히 연구되고 있다[1, 2]. 최근에는 교환결합이 발생하는 영역을 강한 결합과 약한 결합으로 분석하여 교환결합의 발생근원을 알아보려는 시도가 있다[3, 4]. 특히 교환결합력의 크기를 알아내는 방법의 하나로서 이방성 자기저항측정을 이용하기도 하는데 이방성자기저항측정법을 이용할 경우, 반강자성/강자성 박막에서 발생하는 교환결합력의 크기는 자기이력곡선측정에 의한 것보다 2 배 가량 큰 것으로 보고되고 있다. 이는 교환결합력의 크기보다 작은 외부인가자장에 의하여 강자성층의 자화방향이 가역적인 변화를 겪기 때문인 것으로 알려지고 있다[1, 5]. 본 연구에서는 NiO/NiFe 박막에서 이방성자기저항측정을 이용하여 이로부터 강한 교환결합과 약한 교환결합의 자화거동을 알아보고자 한다.

이방성자기저항은 인가자장의 방향에 따라 강자성층의 저항값의 변화가 발생하며 그 표현은 다음과 같다.

$$R = R_0 + \Delta R \cos^2 \theta \quad (1)$$

또한, 이 때의 전체 에너지와 $\cos^2 \theta$ 의 거동은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E = -H \cdot M_s = -H_{ex} M_s \cos(\theta - \theta_{ex}) - H_a M_s \cos(\theta_a - \theta) \quad (2)$$

$$\cos^2 \theta = \frac{\left[\cos \theta_{ex} + \left(\frac{H_a}{H_{ex}} \right) \cos \theta_a \right]^2}{\left[1 + \left(\frac{H_a}{H_{ex}} \right)^2 + 2 \left(\frac{H_a}{H_{ex}} \right) \cos(\theta_a - \theta_{ex}) \right]} \quad (3)$$

주어진 식을 이용하여 외부자장하에서의 이방성 자기저항 효과를 설명할 수 있으나, 반강자성/강자성 박막의 교환결합력의 크기와 비슷한 외부자장하에서의 거동을 표현하는데 한계가 있으며 최근에는 교환결합의 상태를 강한 영역과 약한 영역으로 구분하고 있다.

본 연구에서 강한 교환결합력과 약한 교환결합력의 분포를 조사하기 위하여 그림 1과 같이 조건을 설정하였다. 강한 교환결합력(H_{ex})은 일축이방성자장을 가한 방향으로 전류의 방향과 동일하며 약한 교환결합을 하는 영역(H_{rot})을 정의하였다. 또한 계수 α 는 $\frac{H_{rot}}{H_{ex}}$ 의 비율이며, β 는 $\frac{\theta_{rot}}{\theta_a}$ 의 비율을 나타낸다.

위에서 주어진 식 (3)에 대하여 새로운 변수를 추가하여 (4)의 식을 유도하였다.

$$E = -H \cdot M_s \quad (4)$$

$$= -H_{ex}' M_s \cos(\theta - \theta_{ex}') - H_{rot} M_s \cos(\theta - \theta_{rot}) - H_a M_s \cos(\theta_a - \theta) \quad (5)$$

여기서, 강한 교환결합을 하는 영역의 자화벡터의 방향이 전류의 방향과 평행하다라고 가정하고,

*Tel: (033)730-0415, E-mail: sslee@chiak.sangji.ac.kr

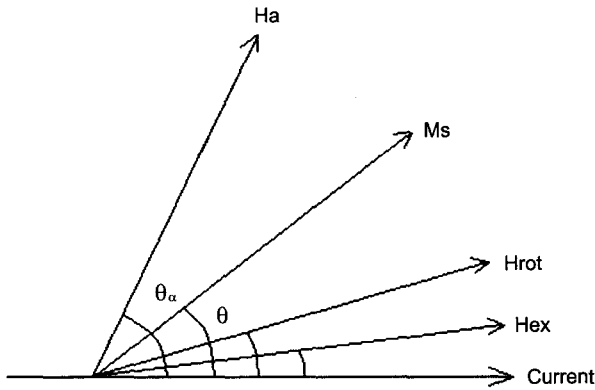


Fig. 1. The schematic diagram of the AMR technique in the NiO/NiFe bilayer.

$$\theta_{ex}' = 0$$

이 된다. 또한,

$$\frac{\partial E}{\partial \theta} = 0$$

이 된다. 이를 $\cos^2 \theta$ 에 대하여 정리하면,

$$\cos^2 \theta = \frac{\left[1 + \left(\frac{H_{rot}}{H_{ex}'} \right) \cos \theta_{rot} + \left(\frac{H_a}{H_{ex}'} \right) \cos \theta_a \right]^2}{\left\{ \left(\frac{H_{rot}}{H_{ex}'} \right) \sin \theta_{rot} + \left(\frac{H_a}{H_{ex}'} \right) \sin \theta_a \right\}^2 + \left[1 + \left(\frac{H_{rot}}{H_{ex}'} \right) \cos \theta_{rot} + \left(\frac{H_a}{H_{ex}'} \right) \cos \theta_a \right]^2} \quad (6)$$

이 유도된다.

유도된 식을 이용하여 분석을 하기 위해 다음과 같이 가정을 하고 식을 정리하였다. 전체의 교환결합력의 크기는 강한 교환결합력과 약한 교환결합력의 벡터합으로 정의하였다.

전체 교환결합력의 크기 중에서 차지하는 약한 교환결합력의 크기를 α 로 정의하였다.

$$\alpha = \frac{H_{rot}}{H_{ex}}$$

따라서, 주어진 수식내의 일부표현식은 다음과 같이 정의하였다.

$$\frac{H_{rot}}{H_{ex}'} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

$$\frac{H_a}{H_{ex}'} = \frac{H_a}{(1 - \alpha)H_{ex}} = \left(\frac{1}{1 - \alpha} \right) \left(\frac{H_a}{H_{ex}} \right)$$

인가되는 외부자장과 이에 따라 회전하는 약한 교환결합력의 자화방향은 다음과 같이 가정하였다.

$$\beta = \frac{\theta_{rot}}{\theta_a}, \quad \theta_{rot} = \beta \cdot \theta_a$$

위의 표현식들에 의해 수정된 식은 아래와 같다.

$$\cos^2 \theta = \frac{\left[1 + \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \cos \beta \theta_a + \left(\frac{1}{1 - \alpha} \right) \left(\frac{H_a}{H_{ex}} \right) \cos \theta_a \right]^2}{\left\{ \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \sin \beta \theta_a + \left(\frac{1}{1 - \alpha} \right) \left(\frac{H_a}{H_{ex}} \right) \sin \theta_a \right\}^2 + \left[1 + \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \cos \beta \theta_a + \left(\frac{1}{1 - \alpha} \right) \left(\frac{H_a}{H_{ex}} \right) \cos \theta_a \right]^2} \quad (7)$$

위의 유도된 식을 가지고 Curve fitting을 하여 계수 α 와 β 의 변화에 대하여 조사하였다.

II. 실험방법

이방성자기저항측정을 이용한 박막의 교환결합연구에 사용된 NiO/NiFe 박막에서 NiO는 신터링된 타겟을 이용하여 RF Magnetron Sputtering 법으로 증착하였고, NiFe는 DC Magnetron Sputtering법으로 증착하였다. 증착된 박막의 기본 구조는 Glass/NiO/NiFe이며, NiO의 두께는 0, 10, 30, 60 nm이며, NiFe층의 두께는 10 nm로 고정하였다. 박막증착시의 기본진공도는 3×10^{-6} Torr이며, 작업진공도는 2×10^{-3} Torr였다. NiO는 160 W의 전력으로 약 0.2~0.3 Å/s의 증착율을 보였으며, NiFe는 약 50 W의 전력을 사용하였다. 시편에 일축이방성을 가하기 위해서 박막의 증착시 일정하게 300 Oe의 인가자장을 가하였다. 제작된 시편은 Lithography 과정을 이용하여 폭 50 μ m, 길이 약 1 mm로 Patterning을 하였으며, 길이의 방향이 일축이방성 자장의 방향과 일치하도록 하였다. VSM을 이용하여 일축이방성 자장에 의한 교환결합의 유무와 크기를 확인하였다. 이방성자기저항의 측정시 낮은 인가자장에서 높은 인가자장의 순서로 측정하였으며, 일축이방성자장의 방향과 인가자장의 각도에 의존하는 자기저항효과를 측정할 때의 각도의 단위는 10°로 하였다. 측정된 이방성자기저항곡선을 이용한 회귀분석법에는 Origin 7.0 프로그램을 이용하였다.

III. 결과 및 토의

그림 2는 NiO(0~60 nm)/NiFe(10 nm) 박막에서 NiO의 두께변화에 의존하는 교환결합력과 보자력의 변화를 나타낸 것이다. 이 시편들에서의 교환결합력의 변화는 NiO의 두께와 비례함을 보여주며, 보자력의 변화는 일정크기에서 포화되는 것을 볼 수 있다. 그림 3의 M-H 곡선에서 확인할 수 있듯이 NiO의 두께에 따라 자기이력곡선의 편향이 관찰되며, 이러한 편향은 NiO의 반강자성적 특성에 의한 것이다. 특히, NiO의 두께가 10 nm일 때는 반강자성층이 존재함에도 불구하고 교환결합력의 크기가 0에 가까운 것은 NiO가 충분히

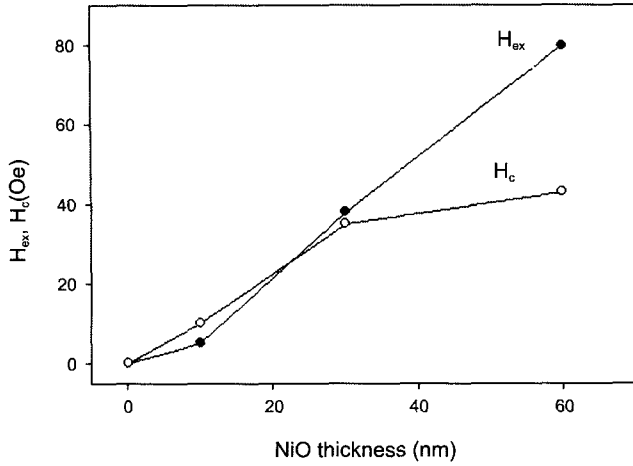


Fig. 2. The exchange coupling field (H_{ex}) and coercive field (H_c) as the variation of NiO thickness in NiO/NiFe bilayer.

NiFe층을 구속하지 못하는 것으로 보여진다.

그림 4는 NiO의 두께변화에 따른 NiO/NiFe 박막의 MFM Image를 나타낸 것이다. NiO의 두께가 10 nm 이하인 경우에는 전형적인 NiFe의 리플형 자구가 보여지고 있다. 특히, NiO의 두께가 10 nm인 경우에 있어서 single NiFe와 같은 리플형 자구가 보인다는 것은 10 nm 두께의 NiO가 반강자성체로서의 역할을 하지 못하고 있다는 증거이기도 하다. 이런 리플형 자구는 NiO의 두께가 증가하면서 사라지는 것으로 보아 NiO의 두께가 각각 30 nm일 때와 60 nm일 때는 강자성층인 NiFe층과의 교환결합이 이루어짐을 알 수 있다.

그림 5는 NiO(60 nm)/NiFe(10 nm) 박막을 인가자장의 크기에 따라 측정한 이방성 자기저항곡선이다. 이방성자기저항 측정시의 인가자장의 크기는 교환결합력의 크기인 80 Oe를 기준으로 하여 2배, 4 배인 경우와 1/2배인 경우로 나누어 측정하였다. 측정시의 외부인가자장의 크기가 감소하면서 자기저항비의 상대적인 세기가 감소하는 동시에 곡선의 모양이 왜곡되는 것을 볼 수 있다. 인가자장의 감소에 따른 자기저항비의 감소는 상대적으로 강하게 교환결합을 하는 영역의 자화벡터가 고정되면서 전도전자들의 산란이 감소되기 때문이다. 자기저항곡선의 편향은 약한 외부자장에 의해 약하게 교환결합을 하는 영역의 자화반전이 매우 제한적으로 발생하는 것으로 생각되며, 특히 낮은 외부인가자장이 가해질 경우에는 각 자구들의 변화는 매우 비가역적인 것으로 생각된다. 인가자장의 크기가 교환결합력의 크기보다 클 때, NiO/NiFe 박막의 약한 교환결합영역과 강한 교환결합영역은 외부 자장에 의하여 회전하므로 자기저항비의 크기와 모양이 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 인가자장의 크기가 교환결합력의 크기와 비슷할 경우에 자기저항비의 크기가 감소하면서 그 모양이 왜

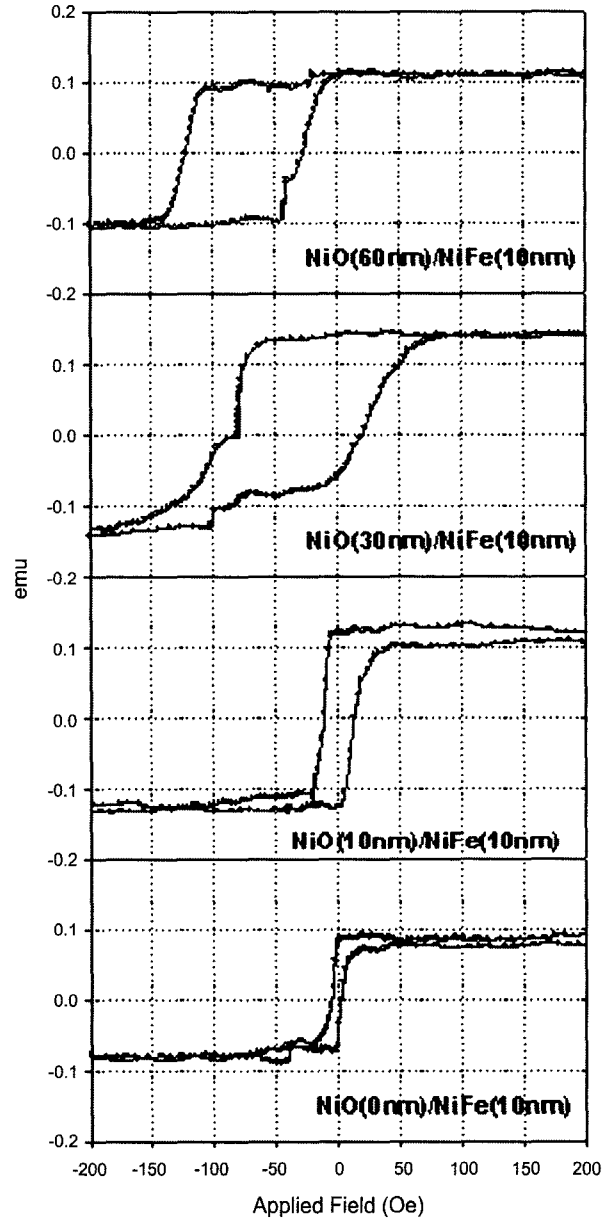


Fig. 3. The hysteresis loop of the NiO(0, 10, 30, 60 nm)/NiFe(10 nm) bilayer.

곡됨을 알 수 있으나 명확하게 설명을 하기는 어렵다.

그림 6은 Origin 7.0 프로그램과 앞에서 유도된 (7)의 식을 이용하여 fitting한 결과이다. 외부인가자장이 320 Oe와 40 Oe일 때는 그림 5와 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 시편의 교환결합력과 같은 80 Oe의 인가자장을 가했을 때는 fitting이 맞지 않음을 알 수 있다. 인가자장이 80 Oe일 때의 fitting 그래프에서 편향된 위치는 측정시의 결과와 일치하는 것으로 판단되지만, 이방성자기저항의 크기에서 차이가 발생한다. 이것은 유도된 식이 아직은 불완전한 상태이며, 이 수식으로 자기저항비의 감소가 설명되지 않음을 보여주며, 향후

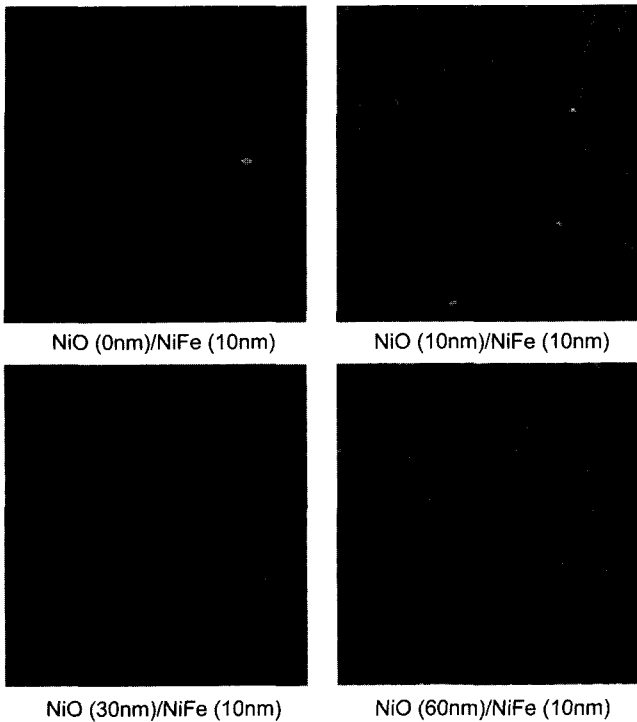


Fig. 4. The MFM Images of the NiO(0, 10, 30, 60 nm)/NiFe(10 nm) films.

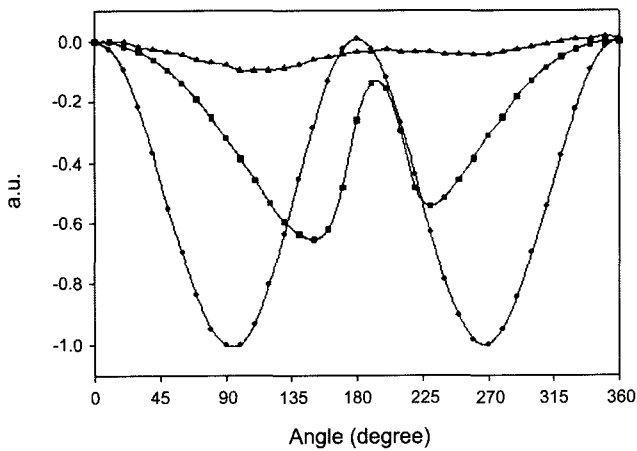


Fig. 5. The different AMR Curve as the variation of Applied Field (● = 320 Oe, ■ = 80 Oe, ▲ = 40 Oe).

더 보완되어야 할 부분이다. 한편, 자기저항곡선의 편향은 그림 5의 측정데이터와 비교해서 큰 차이가 없는 것으로 판단되며, 이것으로서 유도된 식을 이용하여 강한 교환결합영역과 약한 교환결합영역의 비율을 추정할 수 있다.

그림 7은 NiO(60 nm)/NiFe(10 nm)인 박막을 외부인가자장의 크기에 따라서 fitting한 결과로부터 얻어낸 계수 α 와 β 를 나타낸 것이다. 먼저, α 값은 앞에서 설명했듯이 전체교환결합력 중에서 차지하는 약한 교환결합력의 비율이다. Curve

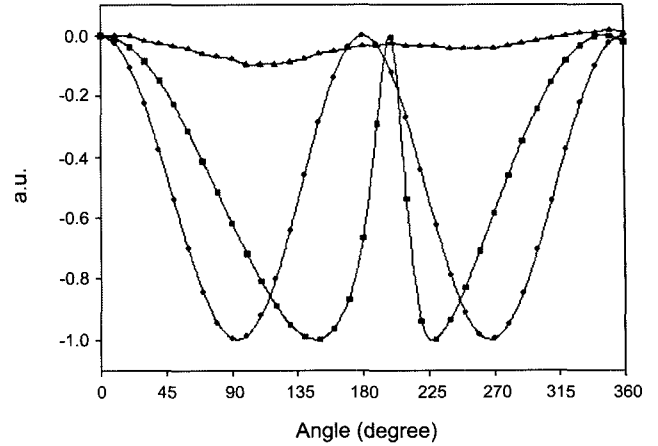


Fig. 6. The Curve Fitted AMR curve as the variation of the Applied Field (● = 320 Oe, ■ = 80 Oe, ▲ = 40 Oe).

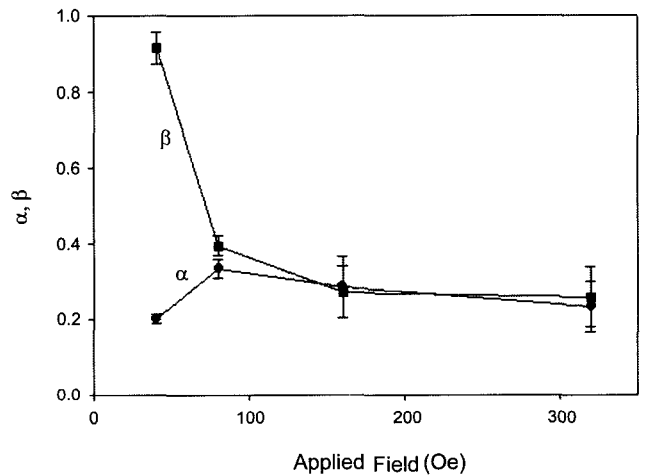


Fig. 7. Derived parameter by curve-fitting as the variation of the Applied Field. Sample structure is NiO(60 nm)/NiFe(10 nm).

fitting 결과, 값의 범위는 대략 0.2~0.4 사이이며, 이것은 약한 교환결합을 하는 영역이 존재함을 의미한다. 한편, β 값은 인가자장의 각도에 대하여 약한 교환결합을 하는 영역의 자화벡터가 회전하는 각도의 비율을 나타낸다. 인가자장의 크기가 클 때에는 강한 교환결합을 하는 영역도 외부 자장의 변화에 따라 자화벡터의 회전을 일으키므로 그 효과가 보이지 않지만, 인가자장이 작아질수록 그 값이 증가함을 알 수 있다. 이는 외부인가자장이 작을 때에 강한 교환결합을 하는 영역의 자화방향이 일축이방성 방향으로 고정되어 있으며, 약한 교환결합을 하는 영역의 자화벡터만이 외부인가자장의 각도 변화에 따라 회전하는 것을 의미한다.

그림 8은 교환결합의 세기가 서로 다른 시편에 대하여 Curve-fitting 결과로부터 얻어낸 계수 α 와 β 를 나타낸 것이다. 앞의 그림 2에서와 같이 NiO의 두께가 10 nm일 때의

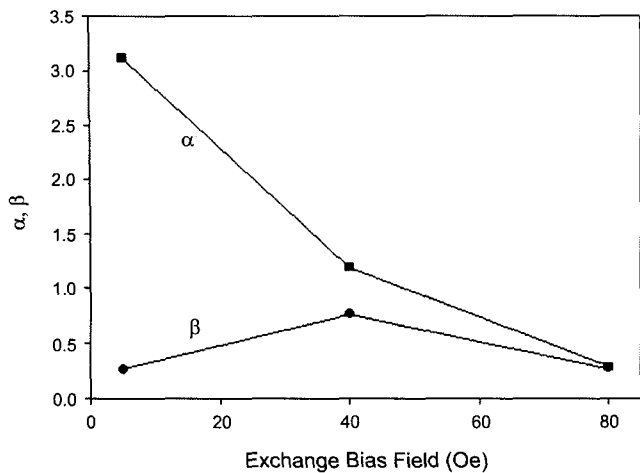


Fig. 8. The variation of parameter by curve-fitting as the variation of exchange coupling field in NiO(10, 30, 60 nm)/NiFe(10 nm) films.

교환결합력은 대략 5 Oe 내외로 매우 작은 값을 나타내며, NiO의 두께가 30 nm, 60 nm일 때의 교환결합력은 각각 40 Oe, 80 Oe를 나타낸다. NiO의 두께가 10 nm일 때, α 값은 3 이상의 값을 나타내고 있다. 앞에서 α 는 H_{rot}/H_{ex} 의 비율로 정의하였는데, 약한 교환결합을 하는 영역의 크기가 일정하다고 가정하면, 이는 전체 교환결합력의 크기가 감소하면서 나타난 결과로 보인다. 즉, NiO가 10 nm의 두께를 가질 때에 교환결합력의 크기가 매우 약하였기 때문에 상대적으로 약한 교환결합력의 크기비율이 높게 나온 것으로 생각된다. α 값의 비율이 교환결합력의 크기가 증가할수록 감소하는 것으로 보아 전체 교환결합력의 크기는 강한 교환결합을 하는 영역에 따라 결정되는 것으로 생각된다. 반면, NiO의 두께가 30 nm일 때에 β 의 값은 NiO의 두께가 10 nm, 60 nm일 때와 비교해서 높게 나왔는데, 이는 Curve fitting 과정에서 수식의 불완전함으로 인해서 생기는 오류로 판단된다. 따라서 NiO와 NiFe의 교환결합의 세기와 관계없이 약한 교환결합을 하는 영역은 일정한 것으로 판단된다.

IV. 결 론

일축이방성을 부여한 NiO/NiFe 박막을 제작하고 이들의 강한 교환결합력과 약한 교환결합력의 분포에 대하여 조사하였다. 제작된 시편들의 교환결합력의 크기는 VSM 측정과 이방성 자기저항측정을 통하여 확인하였으며, 회귀분석법을 통하여 두 교환결합력의 상호관계를 조사하였다. NiO(60 nm)/NiFe(10 nm) 시편의 경우 전체 교환결합력 중에서 차지하는 약한 교환결합력의 크기는 외부인가자장의 크기에 관계없이 일정한 비율($\alpha=0.2\sim0.4$)을 나타내었고 이는 약한 교환결합을 하는 영역이 일정하게 존재함을 보여준다. 교환결합력의 크기가 서로 다른 시편의 경우는 교환결합력의 크기가 작을수록 전체 교환결합력 중에서 차지하는 약한 교환결합력의 크기가 컸으며, 교환결합력의 크기가 증가할수록 그 비율이 감소하였다. 이는 약한 교환결합을 하는 영역이 일정하게 존재한다고 가정할 경우 전체의 평균 교환결합력의 크기가 감소함에 따라 그 비율이 증가한 것으로 해석할 수 있다. 따라서 NiO/NiFe 박막에서 강한 교환결합을 하는 영역과 약한 교환결합을 하는 영역이 일정하게 존재함을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 상지대학교 교내연구비 지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] H. Brown, E. D. Dahlberg, J. Appl. Phys., **89**, 7543(2001).
- [2] T. Gredig, I. N. Krivorotov, C. Merton, A. M. Goldman, E. D. Dahlberg, J. Appl. Phys., **87**, 6418 (2001).
- [3] K. Zhang, T. Kai, T. Zhao, H. Fujiwara, J. Appl. Phys., **89**, 7546(2001).
- [4] B. H. Miller, E. D. Dahlberg, Appl. Phys. Lett. **69**, 3933(1996).
- [5] D. Y. Kim, C. G. Kim, B. S. Park, D. G. Hwang, S. S. Lee, J. Appl. Phys., **85**, 5783(1999).

The Exchange Bias of NiO/NiFe Thin Film by the Measurement of Anisotropic Magnetoresistance

Jong-Kee Kim, Sun-Wook Kim and Ky-Am Lee

Department of Physics Dankook University, Cheonan 330-714, Korea

Sang-Suk Lee* and Do-Guwn Hwang

Department of Computer and Electronic Physics Sangji University, Wonju 220-702, Korea

(Received 11 June 2002, in final form 20 August 2002)

We report an experimental evidence of coexistence of the strong and weak exchange couplings in unidirectional NiO/NiFe (antiferromagnetic/ferromagnetic) bilayer thin films. The exchange bias was measured by VSM and AMR techniques and then, analyzed into the strong and weak exchange couplings by means of a regression method. In NiO(60 nm)/NiFe(10 nm) film, the ratio of the weak exchange coupling field over the average exchange coupling field was found to be almost unchanged within a range from 0.2 to 0.4 irrespective to the strength of an applied field. However, the ratio increased among the samples with decreasing the average exchange coupling field due to the increment of the weak exchange coupling area.

Key words : Strong and weak exchange coupling, Anisotropic Magnetoresistance