

이온 빔 증착법으로 제작한 NiFe/FeMn/NiFe 3층박막의 버퍼층 Si에 따른 결정성 및 교환결합세기 향상

김보경 · 김지훈 · 황도근 · 이상석*

컴퓨터전자물리학과 상지대학교, 강원도 원주시 우산동 660번지, 220-702

(2002년 6월 28일 받음, 2002년 8월 13일 최종수정본 받음)

유리기판 위에 이온 빔 증착(ion beam deposition; IBD)법으로 제작한 버퍼층(buffer layer) Si의 두께에 따른 [NiFe/FeMn/NiFe] 3층박막의 결정성과 교환결합세기(exchange bias field; H_{ex})를 조사하였다. 버퍼층 Si는 NiFe층을 fcc(111)로 매우 우수하게 초기에 결정성장 시켰다. Si/NiFe 위에 증착된 FeMn층은 γ -fcc (111) 구조로 성장함에 따라 안정되고 큰 H_{ex} 를 가졌고, 버퍼층 Si 두께가 50 Å 이상일 때 FeMn과 상부층 NiFe 사이의 H_{ex} 값 의존성은 크게 달랐다. 하부 NiFe/FeMn 이중구조의 H_{ex} 는 110 Oe로 거의 일정하였으며, 상부 FeMn/NiFe 이중구조의 H_{ex} 는 300 Oe 까지 증가하였다. 버퍼층이 Ta일 경우와 비교해서 Si일 때 H_{ex} 와 결정성이 향상되었다.

주제어 : 이온 빔 증착, 버퍼층 Si, NiFe/FeMn/NiFe 3층박막, 교환결합세기

I. 서 론

거대자기저항(giant magnetoresistance; GMR) 스핀밸브(spin valve) 박막들은 고밀도 자기기록에 대한 읽기 출력 헤드에서 검출 소자 개발과 그 응용소자로 각광을 받고 있는 지 오래이다[1]. GMR 스핀밸브 소자에서 NiO, Fe-Mn, Ir-Mn, Pt-Mn, Ni-Mn 등의 반강자성체 특성들이 계면에서 NiFe, Co, CoFe 등의 강자성체와 교환결합세기의 메커니즘(mechanism)은 아직 완전히 밝혀지지 않은 채 그 연구가 국내외 연구팀들에 의해 계속 진행되어 왔다[2, 3]. GMR 스핀밸브 소자의 일반적인 형태로 강자성층에 충분히 큰 교환결합세기를 얻고자 상부에 반강자성층을 증착하게 된다. 반강자성층이 강자성체층에 유도한 교환결합력이 필요에 따라 상하부층 형태로 분리되기도 한다. 일반적으로 GMR 스핀밸브 소자에서는 상부, 하부층 모두 사용될 수 있는 것처럼, 터널링 자기저항(tunneling magnetoresistance; TMR) 소자도 상부, 하부층의 교환결합력을 이용하여, 고감도 성능의 출력 헤드나 MRAM의 자기저항 응용소자로 사용한다. 상부층이 반강자성체인 스핀밸브 형태는 하부층 구조보다 제작상 더 쉬울 수 있다. 예를 들면 Si(100) 기판 위에 직접 증착한 FeMn/NiFe 층은 큰 교환결합세기를 얻을 수 없고, 교환결합세기 생성에 필요한 (111) 결정으로 성장하지 못한다. 반강자성 γ -FeMn(111)이 FeMn/NiFe층의 교환결합력을 결정하는 가장 중요한 요인임은 잘 알려진 사실이다[4]. 버퍼층 Ta 보다 Si를 이용하면 NiFe층 위에 성장한 FeMn층의 교환결합력이 증가된다

는 것이 이미 일본의 S. Nakagawa의 연구팀에 의해 발표되어 있다[5]. 본 연구에서는 IBD법으로 증착한 버퍼층 Si 위에 [NiFe/FeMn/NiFe] 삼층박막의 결정성과 교환결합세기를 향상시키는 특성을 버퍼층 Ta의 경우와 비교하여 보았다.

II. 실험방법

Fig. 1은 일반적인 형태로 교환결합층을 갖는 Si 두께에 따른(a) glass/Si/NiFe/FeMn/Ta 다층구조와 (b) glass/Si/NiFe/FeMn/NiFe/Si 다층구조를 도시한 것이다. (b) 형태의 다층구조에서 버퍼층과 상부 보호층을 모두 Si로 하였다. 두 가지 다층박막 구조의 시료들은 Corning #7059 glass 위에 이온빔 증착 시스템을 이용하여 상온에서 제작하였다. 6개의 3-인치 타겟이 장착된 초진공(ultra-high vacuum; UHV) 이온빔 시스템(system)은 기본 진공도가 6×10^{-9} Torr 이었다[6]. Si 증착에 필요한 타겟은 인(phosphorus; P)이 도핑된 전도도 $12 (\Omega\text{cm})^{-1}$ 인 3-인치 n-형 Si 웨이퍼를 사용하였다. 사용한 이온건은 3-cm 흑연(graphite) 그리드(grid) 크기의 카프만(Kaufmann) 소스(source)이었다. 이온 빔 생성에 필요한 아르곤 가스 분압은 0.1 mTorr로 하였고, 증착율과 증착 균일도를 결정하는 가속전압, 양극(anode)의 방전전압, 이온빔 전압 및 전류값을 각각 100 V, 35 V, 800 V, 6.0 mA로 하였다. 이 조건에서 Ta, Si, Ni₈₀Fe₂₀, Fe₅₀Mn₅₀층의 증착율은 각각 0.20 Å/s, 0.32 Å/s, 0.13 Å/s, 0.13 Å/s이었다[7]. 증착된 각각의 Ta, Si, NiFe, FeMn 단일박막을 EDAX(energy dispersive analysis spectrum)와 AFM(atomic force microscope)로 분석한 결과 불순물이 발견되지 않았고, 도핑한 타겟과 동일한

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

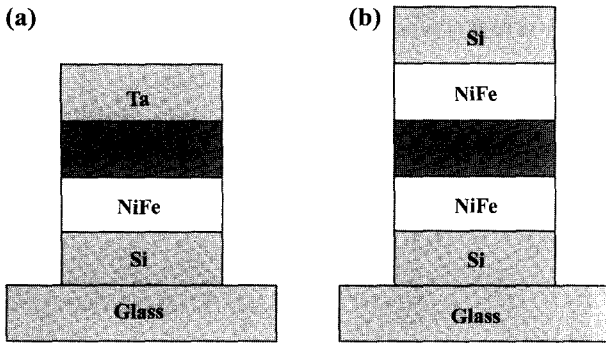


Fig. 1. Schematic configuration of (a) conventional type [Si/NiFe/FeMn/Ta] multilayer and (b) composite type [Si/NiFe/FeMn/NiFe/Si].

특성인 전도도(conductivity), 홀 농도 (Hall concentration), 광 밴드 에너지(optical band gap) 등을 유지하였다. 특히 NiFe와 FeMn은 타겟 원자성분비와 거의 일치하는 고순도 박막으로 나타났으며, 또한 표면거칠기는 1.0 Å 이내로 양호하였다. 상온에서 증착한 모든 자성체 시료는 증착시 자기장 500 Oe 크기를 갖는 영구자석을 이용하여 용이축(easy-axis)과 곤란축(hard-axis)이 분리된 일축 이방성을 유도하였다. 모든 박막 시료는 더 이상의 이방성 유도를 위해 후 진공 열처리하는 하지 않았다. 교환결합세기와 보자력(coercivity; H_c)은 VSM(vibrating sample magnetometer)과 4단자 자기저항 측정 시스템으로 얻은 M-H 히스테리시스곡선이나 AMR(anisotropy magnetoresistance) 곡선으로부터 결정하였다.

III. 실험결과 및 분석

Fig. 1a에서 도시한 다층구조 Glass/Si(0, 15, 30, 70, 150 Å)/NiFe(120 Å)/FeMn(200 Å)/Ta(50 Å) 박막에 대한 버퍼층 Si의 두께에 따른 결정 의존성을 관찰하여 얻은 X선 회절기(X-ray diffractometry; XRD) 2θ 패턴(pattern)을 Fig. 2에 나타내었다. 버퍼층 Si가 없는 시료는 FeMn(111) 결정 성장이 거의 이루어지지 않았다. 그러나 Si의 두께가 15 Å부터 FeMn(111) 결정성장이 매우 잘 이루고 있음을 보여 준다. 또한 Si층의 두께가 증가할수록 FeMn(111) 뿐만 아니라 NiFe(111) 결정성이 같이 증가함으로 버퍼층 Si의 역할은 NiFe(111)으로 초기성장을 유도하고 그 위에 FeMn(111)으로 잘 성장시키고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3은 Glass/Si(100 Å)/NiFe(30, 50, 70, 100, 120, 150 Å)/FeMn(200 Å)/Ta(50 Å) 박막에 대한 강자성층 NiFe의 두께에 따른 NiFe/FeMn 박막의 결정성장을 보여주는 XRD 패턴이다. 여기서 버퍼층 Si는 100 Å, 반강자성층 FeMn은 200 Å으로 고정했을 때 비록 NiFe층의 두께가 30 Å이라도 FeMn(111) 성장이 잘 이루어 졌으며, NiFe층 두께가 150 Å

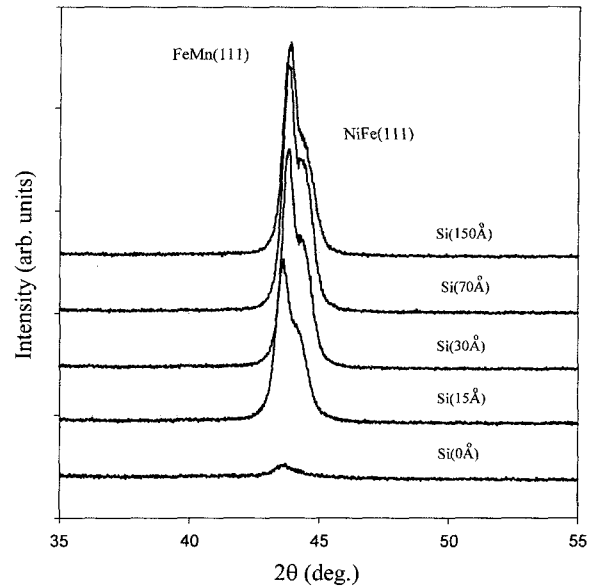


Fig. 2. XRD patterns of the glass/Si(t)/NiFe(120 Å)/FeMn(200 Å)/Ta(50 Å) on the various thickness of buffer Si layer from 0 to 150 Å.

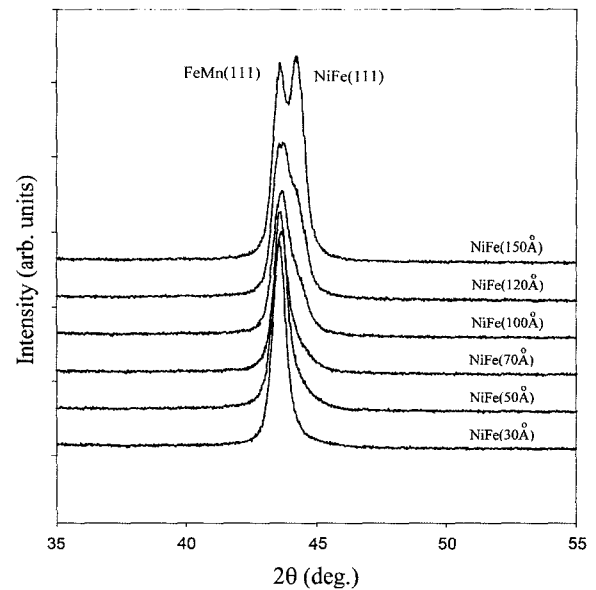


Fig. 3. XRD patterns of the glass/Si(100 Å)/NiFe(t)/FeMn(200 Å)/Ta(50 Å) on the various thickness of NiFe layer from 30 Å to 150 Å.

로 증가 했을 때 서서히 NiFe(111) 결정성도 매우 우세하게 나타났다. 이로서 그림-2에서 보여준 것 처럼 Si층 없이 바로 증착된 NiFe/FeMn 이층 박막은 거의 집합조직이 발달하지 않는 무방향 미세 다결정(random oriented polycrystalline) 성장을 하나, Si의 초기성장에서 생긴 NiFe(111) 결정방향 성장은 결정 조직 형태로 이루어진다는 것이다. 이런 사실은 Kitakami 등에 의해 지적된 Si 표면에서 Si 원자의 높은 활성도(activity)에 관련된다고 볼 수 있다[8].

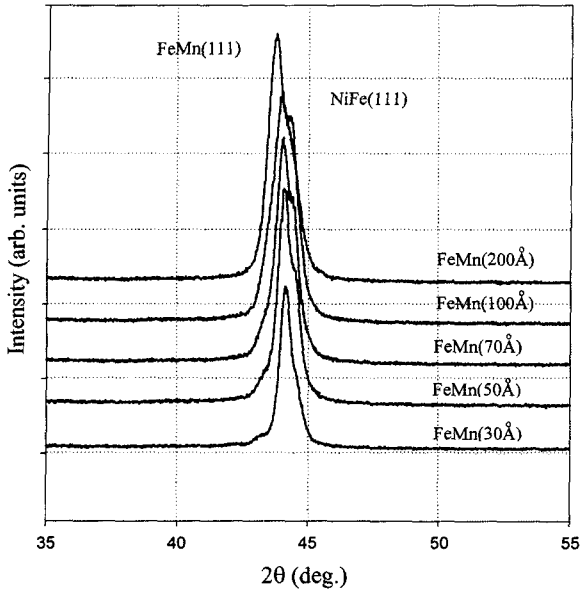


Fig. 4. XRD patterns of the glass/Si(100 Å)/NiFe(120 Å)/FeMn(t)/NiFe(70 Å)/Ta(50 Å) on the various thickness of antiferromagnetic FeMn layer from 30 Å to 200 Å.

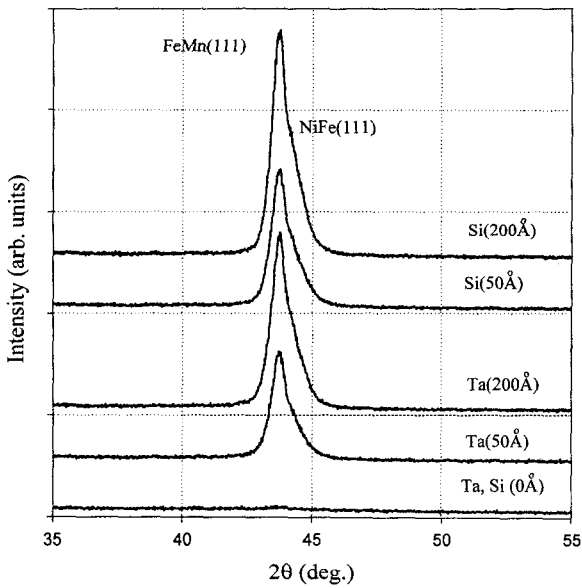


Fig. 5. XRD patterns of the glass/Ta, Si(t)/NiFe(120 Å)/FeMn(200 Å)/NiFe(70 Å)/Ta, Si(50 Å) on the various thickness of buffer Ta and Si layers from 0 to 200 Å.

Fig. 4는 Fig. 1b에서 도시한 다층구조 Glass/Si(100 Å)/NiFe(120 Å)/FeMn(30, 50, 70, 100, 200 Å)/NiFe(70 Å)/Si(50 Å) 박막에 대한 반강자성층 FeMn의 두께에 따른 결정 의존성을 보기위해 얻은 XRD 2θ 패턴이다. Si/NiFe 바닥층이 존재 하에서 성장하는 NiFe/FeMn/NiFe 다층구조의 우세한 (111) 방향 성장은 무엇보다도 교환결합과 보자력의 크기를

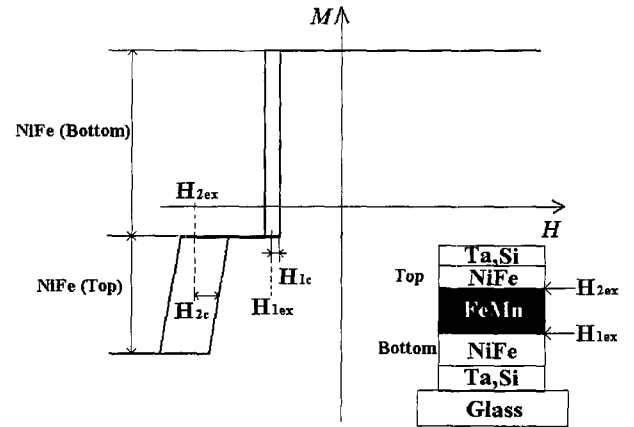


Fig. 6. Schematic M-H characteristics of NiFe/FeMn/NiFe layers deposited on buffer layers and the definitions of exchange field to the bottom and top NiFe layers with H_{1ex} and H_{2ex} , H_{1c} and H_{2c} respectively.

결정짓는 주요한 요인으로 볼 수 있다. 이미 버퍼층 Si에 의해 성장한 NiFe(111)로 인하여 FeMn(111)이 효과적으로 잘 성장하고 있으며 FeMn을 사이에 둔 상부, 하부층 NiFe와의 서로 다른 교환결합세기를 향상시킬 것으로 예상된다.

Fig. 5는 버퍼층이 각각 Ta과 Si일 때 Glass/Ta, Si(0, 50, 200 Å)/NiFe(120 Å)/FeMn(200 Å)/NiFe(70 Å)/Si(50 Å) 박막에 대해 다른 두 버퍼층 효과를 비교한 XRD 2θ 패턴이다. 버퍼층이 없을 때는 Fig. 2에서 언급한 것과 같이 버퍼층이 NiFe/FeMn/NiFe(111) 성장을 할 수 없었다. Ta일 때도 Si와 마찬가지로 FeMn(111) 결정성장이 매우 우세하다. 그러나 자세히 보면 버퍼층 Si일 때에 Ta 보다 FeMn(111) 뿐만 아니라 NiFe(111)이 잘 성장함을 알 수 있다. 따라서 버퍼층 Si는 NiFe층을 (111) 방향으로 매우 우세하게 초기성장을 시킴으로써 FeMn/NiFe(111) 성장을 유도하는 것으로 사료된다.

본 연구에서는 FeMn 사이에 하부에 Si/NiFe층을 상부에 NiFe/Si를 증착했을 때 Fig. 1b에 도시한 다층구조 Glass/Si/NiFe/FeMn/NiFe/Si 박막에 대한 그 자기적 특성으로 H_{ex} 와 H_c 를 조사하였다. FeMn층에 인접한 두 NiFe층의 두께별 효과는 상부층과 하부층은 서로 그 특성이 다를 것으로 예상된다. 따라서 M-H 곡선을 도시화 하여 Fig. 6에 나타내었다. 각각 상 하부층의 H_{1ex} , H_{1c} 와 H_{2ex} , H_{2c} 를 개별적으로 조사할 수 있으므로 분별이 용이하다. 즉, 하부층 NiFe와 상부층 NiFe의 두께 차이가 약 1.7배이므로 자화 값도 같은 크기로 차이를 가지며, 교환결합세기의 상호간 차이로 인해 서로 확연히 분리된 M-H 곡선으로 Fig. 6과 같게 된다. 상부층 NiFe는 FeMn이 하부층 결정성장보다 양호함과 박막이 내포하는 결함(defect), 계면전위(dislocation), 표면거칠기의 감소 등으로 보다 큰 H_{2ex} , H_{2c} 를 표현한 Fig. 6처럼 나타낼 수 있다.

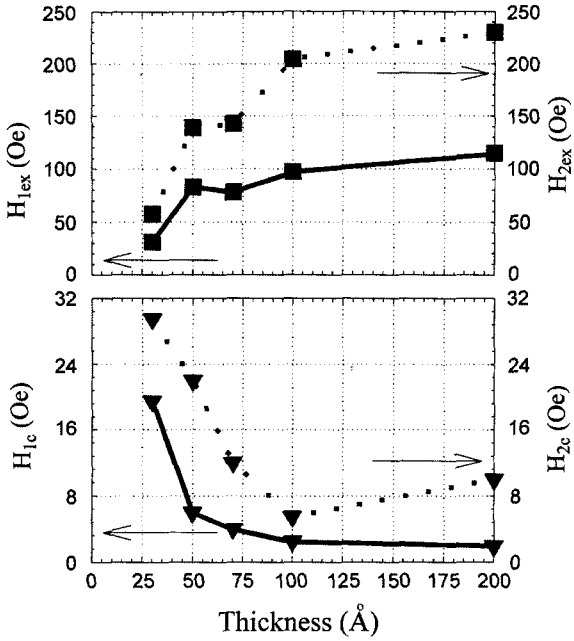


Fig. 7. Exchange coupling fields H_{1ex} and H_{2ex} , coercivities H_{1c} and H_{2c} for the glass/Si(100 Å)/NiFe(120 Å)/FeMn(t)/NiFe(70 Å)/Si(50 Å) multilayers as a function of the thickness of antiferromagnetic FeMn layer.

Fig. 7은 Fig. 1b에 도시한 다층구조 Glass/Si(100 Å)/NiFe(120 Å)/FeMn(t)/NiFe(70 Å)/Si(50 Å) 막에 대한 FeMn의 두께에 따른 상하부층 NiFe층이 FeMn 사이에 일어나는 교환결합세기와 보자력을 각각 H_{2ex} 와 H_{1ex} , H_{2c} 와 H_{1c} 로 했을 때 반강자성체 FeMn층 두께에 따른 그 의존성을 나타낸 것이다. H_{1ex} 는 FeMn가 50 Å일 때 이미 85 Oe로 증가하다가 100 Å 이상에서는 100 Oe로 거의 일정한 값을 유지하고 있으나 H_{2ex} 는 두께에 따라 증가하다가 100 Å부터는 H_{2ex} 가 200 Oe 이상으로 완만하게 증가한다. 이에 반하여 FeMn 두께에 따른 H_{2c} 와 H_{1c} 는 교환결합세기 의존성과 완전히 다르게 두께에 반비례하는 경향을 보여주고 있다. 즉 FeMn이 30 Å일 때 H_{2c} 와 H_{1c} 는 각각 20 Oe와 39 Oe로 최대값을 100 Å일 때 3 Oe와 5 Oe 최소값을 갖는다.

Fig. 8은 Glass/Ta, Si(t)/NiFe(120 Å)/FeMn(200 Å)/Ta, Si(50 Å) 박막에 대한 버퍼층 Ta와 Si의 두께가 각각 0에서 400 Å까지 변할 때 H_{ex} 와 H_c 의존성을 보여준다. 버퍼층 Si일 때가 Ta 보다 더(111) 결정성이 우수하므로 H_{2ex} 는 두께가 증가함에 따라 서서히 증가한다. Ta의 두께가 150 Å일 때 275 Oe 최대 교환결합세기를 갖지만 H_{2ex} 는 점차 감소하여 400 Å일 때는 120 Oe의 값으로 줄어든다. 반면에 Si는 300 Å일 때 최대 300 Oe 까지 증가하고 있다. NiFe/FeMn/NiFe (111) 결정성을 우수하게 성장시키는데 Si는 Ta 보다 NiFe층에서 결정성이 우수하게 되며 결국 γ -FeMn(111)를 더

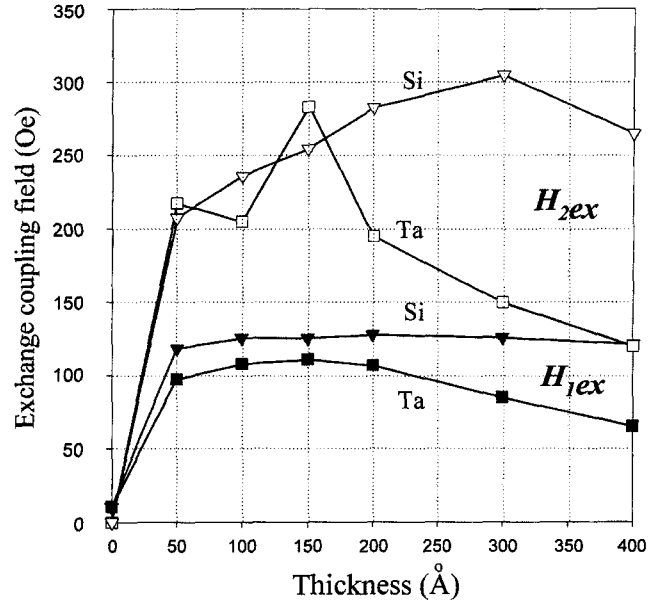


Fig. 8. Thickness dependence of buffer Ta and Si layers of H_{1ex} and H_{2ex} , H_{1c} and H_{2c} for the glass/Ta, Si(t)/NiFe(120 Å)/FeMn(200 Å)/NiFe(70 Å)/Ta, Si(50 Å) multilayers.

욱 강하게 성장시키게 된다. 이로서 후열처리가 없어도 버퍼층 Si를 사용할 경우 상부층 NiFe의 두께 70 Å에서 300 Oe 정도의 높은 H_{ex} 를 얻을 수 있으며 표면저항값도 Ta 보다 높은 값을 유지하였다. 그러나 실제로 응용인 하부층 GMR를 갖는 스핀밸브 박막 소자 제조시 전체의 두께를 감소시키기 위해 Si층 두께를 줄일 뿐만 아니라, NiFe층의 두께를 조절하고 CoFe, Pt, Ru, Cu 등의 층들을 매우 얇게 삽입하여 높은 교환 이방성을 유지하면서 저항을 작게하는 연구가 현재 진행 중이다. 또한 다층박막의 버퍼층 Si 두께가 400 Å로 증가함에 따라 다층박막의 저항값은 거의 변하지 않아 버퍼층으로 누설효과(shunting effect)를 막는 역할을 충분히 하였다. 이러한 결과는 버퍼층이 Si일 때가 다층박막 구조에 형성된 결정입자 (grain)들의 크기가 작게 됨에 기인하여 Ta일 때 보다 우수한 γ -FeMn(111) 결정성이 교환결합세기를 상대적으로 향상시키는 것으로 사료된다[5]. Si 버퍼층의 두께를 두껍게 하여 높은 교환이방성을 얻은 것이 소자개발에 따른 실용적인 측면에서 문제가 있으므로 보다 상세한 재료, 물성 연구를 통해 이론적이고, 응용성이 가능하고 참신한 실험결과를 다음 논문에 발표할 것이다.

IV. 결 론

이온빔 증착법으로 제작한 NiFe/FeMn/NiFe 다층구조의 교환결합세기의 특성과 결정성과의 관계를 조사하였다. 버퍼층

Si 위에 성장한 NiFe 박막은 (111) 축으로 초기 성장을 시켰고, 그 위에 증착된 fcc γ -FeMn(111) 결정성을 매우 우수하게 성장하였다. 버퍼층 Si는 FeMn와 상하부층 NiFe 계면에서 일어나는 교환결합세기와 fcc(111) 결정성이 버퍼층 두께에 따라 증가하였다. 버퍼층 Si의 두께가 300 Å에서 교환결합세기는 약 300 Oe이었고, 두께에 따른 교환결합세기 의존성은, H_{2ex} 의 경우 150 Å 버퍼층 두께 이상에서 버퍼층 Ta보다 월등히 좋았으나, H_{1ex} 의 경우 큰 차이가 없었다. 따라서 버퍼층 Si에 형성된 NiFe/FeMn/NiFe(111) 결정성장은 매우 우수하였다.

감사의 글

본 연구 결과는 2001-2002 상지대학교 교내 연구과제와 과학기술처의 특정연구개발사업인 극미세과제 프로그램의 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] B. Dieny, V. S. Speriosu, S. Metin, S. S. P. Parkin, B. A. Gurney, P. Baumgart, and D. R. Wilhoit, *J. Appl. Phys.* **69**, 4774 (1991).
- [2] B. Dieny, *Europhys. Lett.* **17**, 1333(1994).
- [3] S. K. Kim, S. C. Shin, and K. Y. Kim, *J. Kor. Phys. Soc.* **39**, 1060(2001).
- [4] R. Nakatani, M. Hoshino, S. Noguchi, and Y. Suguta, *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, 1333(1994).
- [5] S. Nakagawa, K. Nishimura, Y. Shimizu, and M. Naoe, *IEEE Trans. On Magn.* **35**, 2970(1999).
- [6] S. S. Lee, S. X. Wang, C. M. Park, J. R. Rhee, C. S. Yoon, P.J. Chang, and C. K. Kim, *J. Magn. Magn. Mater.* **239**, 129 (2002).
- [7] S. S. Lee, J. R. Rhee, C. M. Park, S. X. Wang, D. G. Hwang, M. Y. Kim, and J. Y. Hwang, *phys. stat. sol. (a)* **189**, 659 (2002).
- [8] O. Kitakami, S. Okamoto, and Y. Shimada, *J. Appl. Phys.* **79**, 6880(1996).

Enhancement of Crystallinity and Exchange Bias Field in NiFe/FeMn/NiFe Trilayer with Si Buffer Layer Fabricated by Ion-Beam Deposition

Bo-Kyung Kim, Ji-Hoon Kim, Do-Guwn Hwang, and Sang-Suk Lee*
Department of Computer and Electronic Physics, Sangji Univ., Wonju 220-702, Korea

(Received 28 June 2002, in final form 13 August 2002)

Enhancement of crystallinity and exchange bias characteristics for NiFe/FeMn/NiFe trilayer with Si buffer layer fabricated by ion-beam deposition were examined. A Si buffer layer promoted (111) texture of fcc crystallinities in the initial growth region of NiFe layer deposited on it. FeMn layers deposited on Si/NiFe bilayer exhibited excellent (111) crystal texture. The antiferromagnetic FeMn layer between top and bottom NiFe films with the buffer Si 50 Å-thick induced a large exchange coupling field H_{ex} with a different dependence. It was found that H_{ex} of the bottom and top NiFe films with Si buffer layer revealed large value of about 110 Oe and 300 Oe, respectively. In the comparison of two Ta and Si buffer layers, the NiFe/FeMn/NiFe trilayer with Si could possess larger exchange coupling field and higher crystallinity.

Key words : Ion-beam deposition, NiFe/FeMn/NiFe trilayer, Exchange bias field, Si buffer layer