

## Rf 마그네트론 스퍼터링으로 제조된 퍼멀로이 박막의 자기이방성 조절을 위한 NdFeB 영구자석의 영향 및 자기특성 해석

이영훈\* · 김기현 · 김종렬

한양대학교 금속재료공학과, 경기도 안산시 425-791

(2001년 10월 13일 받음, 2002년 4월 22일 최종수정본 받음)

마그네트론 스퍼터링을 이용하여 퍼멀로이 박막의 제조시 요구되는 자기이방성 조절을 위하여 필요한 조건을 NdFeB 자석과 3-D 전산모사를 이용하여 평가하였으며, 또한 같은 조건에서 제조된 박막의 특성을 조사하였다. 타겟과 기판과의 거리가 5 cm 인 경우 타겟 자석과 자기이방성 조절을 위하여 장입된 영구자석의 상호 작용에 의하여 기판에 평행한 자속을 얻기 위한 조건이 전산모사 결과 영구자석간의 거리 변화에 매우 민감하였으며, 최적의 조건의 두 영구자석의 간격이 70 mm에서 가장 균질한 자속을 대면적에서 얻을 수 있음이 확인되었다. 투입전력 450 W에서 기판에 장착시킨 NdFeB 자석간 거리(48, 60, 70, 80, 85 mm)를 변화시킨 결과 포화자화 값은 10~12 kG, 보자력은 0.2~1 Oe, 비저항은  $20 \mu\Omega\text{cm}$ 의 값을 갖는 퍼멀로이가 제조되었으며, 자기적 이방성은 전산모사의 결과와 일치하였다. 그 결과 자석간의 간격이 70 mm에서 제조된 두께  $1 \mu\text{m}$  퍼멀로이의 유효투자율이 10 MHz에서 2500을 유지하는 결과를 얻었다.

주제어 : 3D 전산모사, 자기이방성, 고투자율, 퍼멀로이

### I. 서 론

최근 휴대용 통신기기의 급속한 보급이 진행되면서 사용되고 있는 전자기 소자의 소형, 경량, 박형화에 대한 요구가 증대되고 있다[1]. 특히 인덕터 소자의 소형화는 전체적인 제품의 경량, 박형화에 결정적인 요인으로 인지되고 있으며 또한 박막 인덕터 소자는 종래의 벌크형 소자에 비하여 우수한 고주파 특성, 높은 전력밀도 및 낮은 열 발생량 등의 우수한 장점을 갖고 있음이 알려져 있다[2]. 그러나, 박막으로 제조된 인덕터의 코어 특성은 벌크형 재료에 비하여 연자성 특성이 열등하여 우수한 자기적 특성을 갖는 인덕터 소자의 개발을 위해서는 1) 우수한 일축자기이방성, 2) 낮은 보자력, 3) 높은 포화자화 값을 갖는 코어의 개발이 강력히 요구되고 있다[3]. 특히, 자기이방성은 자기변형과 함께 연자기 박막의 투자율과 보자력에 큰 영향을 미치기 때문에 박막인덕터와 같은 자기소자에서 고주파 특성을 향상시키기 위해서는 자기이방성의 조절이 매우 중요하다[4]. 일반적으로 MHz 영역의 주파수 범위에서는 자화공란축 방향으로 자화되도록 해야 자기소자의 고주파 특성을 향상시킬 수 있다[5]. 따라서 자기코어용 연자성 박막을 증착할 때 이를 고려하여 증착하여야 하기 때문에 이를 위해 박막 증착시 외부 자장에 의한 자기이방성 조절이 중요하며, 특히 제조하고자 하는 기판내에서 균일한 자기이방성의 조절이 중요한 문제가 되고 있다.

본 연구의 목표는 마그네트론 스퍼터링을 이용하여 자기 이

방성이 제어되며, 우수한 연자성 특성을 갖는 퍼멀로이 자성 코어 재료의 제작이다. 증착시에 균질한 자기이방성 조절을 위해 사용된 NdFeB 영구자석의 누설자속의 공간적인 분포를 3-D 전산모사로 평가하고 이를 제조된 퍼멀로이 박막의 자기적 특성과 비교 분석하여 4인치 웨이퍼의 기판 내에서 균일한 일축 자기 이방성을 갖는 우수한 인덕터 소자의 개발에 활용하고자 하는데 목적이 있다.

### II. 실험 방법

퍼멀로이 박막의 제조는 rf 마그네트론 스퍼터를 이용하였으며 증착조건은 Table I에 나타내었다. 본 실험에서 사용된 마그네트론 스퍼터에는 타겟 하단부에 타겟 자석(NdFeB 35계 ~2.5 kG)이 설치되어 있다. 또한 퍼멀로이 박막의 자기이방성을 조절하기 위하여 추가적으로 두개의 NdFeB 막대자석(~2 kG,  $10 \times 10 \times 80 \text{ mm}$ )을 기판과 같은 위치에 길이 방향으로 평행하게 설치하였다. 자석간 거리(48, 60, 70, 80, 85 mm)를 조절함에 따른 누설자속의 공간적인 분포 및 세기를

Table I. Sputtering condition for permalloy thin film manufacture

Target	Ni <sub>81</sub> Fe <sub>19</sub> (99.999 %)
Substrate	Si(100)
Vacuum	$<1.0 \times 10^{-6}$ Torr
rf input power	200~500 W
Working pressure	1 mTorr
T-S distance	5 cm
Thickness	0.5~3 $\mu\text{m}$

\*Tel: (031)400-4013, E-mail: gump0629@hanmail.net

먼저 조사하였으며(초기 자석간 거리를 48 mm로 정한 것은 실험용 Si기판상의 자석 위치의 최소거리가 48 mm이며, 85 mm는 기판안에 NdFeB 자석이 들어갈 수 있는 최대 거리이다.), rf 마그네트론 스퍼터링과 동일한 조건하에서 그려진 진공조 내부의 타겟 자석을 고려한 전산모사를 실행하여 실제 증착 실험시 퍼멀로이 박막의 이방성을 조절할 수 있는 자료로써 활용되었다. 본 연구에서 이용된 전산모사 프로그램은 유한요소법을 이용하여 자성분포를 계산하는 상용화된 Ansoft사의 Maxwell 3D이다.

제조된 퍼멀로이 박막은 surface profile을 이용하여 두께를 측정하였고, 포화자속밀도와 보자력은 진동형 시료 자속계(Vibrating Sample Magnetometer)을 이용하여 상온에서 측정하였다. 이 때 포화자속밀도와 보자력은 최대 100 Oe의 자기장을 가한 상태에서 측정하였다. 박막의 실효투자율( $\mu_{eff}$ )은 B-H loop tracer를 이용하여 자화용이 방향과 자화곤란 방향을 확인한 후, 8자 코일법을 이용한 Ryowa사의 MMS-5000 사용하여 100 MHz까지 측정하였다. 또한 박막의 비저항( $\rho$ )은 4 단자법을 이용하여 측정하였다

### III. 결과 및 고찰

Fig. 1은 스퍼터링에 투입된 전력의 양에 따른 퍼멀로이 박막의 자기적 특성의 변화를 나타내었다. 그 결과 제조된 박막은 모두 자화용이축 방향과 자화곤란축 방향에 대한 보자력은 1 Oe 이하의 값을 갖는 우수한 연자성 박막이 제조되었음을 나타내고 있으며, 포화자화의 값은 투입전력이 증가함에 다소 차이(10~11.32 kG)가 관찰된다. 이는 투입전력에 따른 결정구조 및 조성변화 등으로 예측되나, 차후 TEM 등 다른 미세구조적 관찰을 필요로 하다고 사료되며, 실험은 가장 우수한 자기적 특성을 갖는 450 W로 증착조건을 결정하였다.

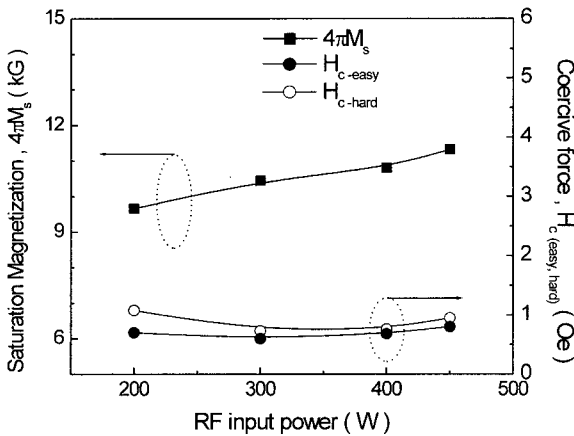


Fig. 1. Saturation magnetization and coercive force with the increment of input power.

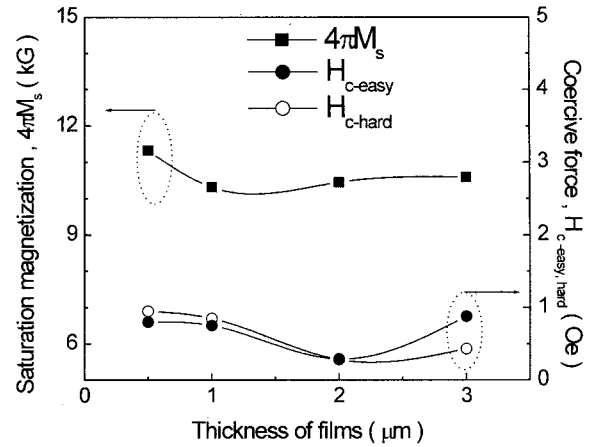


Fig. 2. Saturation magnetization and coercive force with the variation of film thickness.

박막 두께(0.5 μm, 1 μm, 2 μm, 3 μm)의 변화에 따른 자기적 특성을 보면, 포화자화와 자화용이방향과 자화곤란방향에 대한 보자력의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 박막의 두께에 따른 포화자화값 역시 큰 변화를 보이지 않고, 약 10~11 kG 정도의 값을 보였다. 보자력 또한 박막 두께의 변화에 관계없이 1 Oe 이하의 값을 보였으며, 특히 2 μm의 두께에서 보자력은 약 0.3 Oe 값으로 가장 작은 값을 나타내었고, 이에 대한 자기이방성을 보여주는 B-H loop를 보면 Fig. 3과 같았다.

박막의 두께에 따른 투자율의 값과 손실은 주파수 영역이 5 MHz에서 Fig. 4과 같이 모든 시료가 약 2000 이상의 값을 보였다. 시료의 두께가 증가함에 따라 5 MHz 실효투자율의 값은 3400에서 2000까지 서서히 감소함을 확인하였으며, 두께가 0.5 μm인 시료의 경우는 100 MHz까지 3000 이상의 투자율을 유지하였으나 1 μm, 2 μm의 경우는 0.5 μm 두께의 시료에 비하여 투자율이 약간 감소했을 뿐 아니라 투자율의

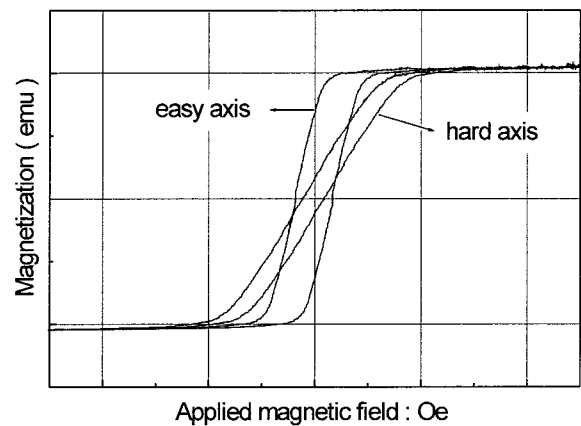


Fig. 3. Magnetic anisotropy field of permalloy thin film.

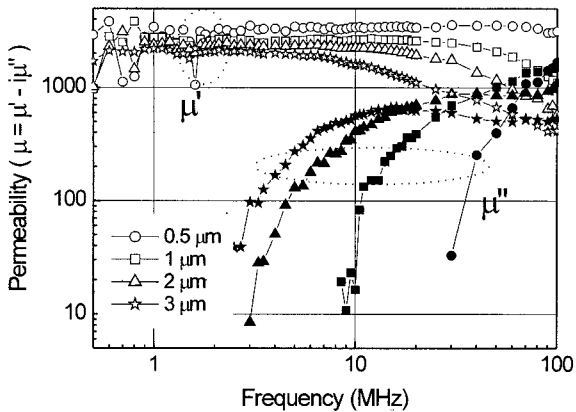


Fig. 4. Permeability and loss term with the variation of film thickness.

값( $\mu'$ )이 10 MHz까지만 유지되었으며, 3  $\mu\text{m}$  두께의 시료는 5 MHz까지 투자율을 유지하였다. 또한 두께가 증가함에 따라 시료의 비저항은 거의 변화가 없는 반면에 투자율의 허수부분( $\mu''$ )이 나타내는 주파수에 따른 손실은 시료의 두께가 증가함에 따라 증가하였다. 따라서 제조된 시편은 이미 보고된 특성과 비교하였을 때, 우수한 연자기 특성으로 인하여 5 MHz 이하의 박막 인덕터의 코어재료로서 훌륭한 자기적 특성을 갖는 재료를 구현할 수 있었다.

Fig. 5(a)는 rf 마그네트론 스퍼터링을 450 W의 전력을 공급하여 제조한 1  $\mu\text{m}$  두께의 퍼멀로이 박막의 자화용이축 방향을 B-H loop tracer로 측정된 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 자화방향은 시편의 위치에 따라 90° 이상 회전되고 있음을 나타낸다. rf 마그네트론 스퍼터는 플라즈마의 생성용이 및 시편제작의 여러가지 이점으로 인하여 자성체 제조에 다양하게 이용되고 있다. 그러나, 장비에 장입되어 있는 마그네트(본 실험장비의 경우 NdFe35계~2.5 kG)에 의한 누설자장이 있으며, 이와 같은 자장의 변화에 따라서 자화용이축의 Fig. 5(a)에서와 같이 발생된 것으로 판단된다. 이와 같은 자화방향의 변화는 자기소자의 제조시 전술한 바와 같이 매우 특성을 열화시키는 요소로 작용한다. 따라서, 이와 같은 문제점을 개선하기 위해서는 기판에 걸리는 자장의 조절이 필요하다. Fig. 5(b), (c), (d)는 기판 위에 NdFeB 막대자석(~2 kG)를 48, 70, 85 mm의 간격으로 각각 배치하고 증착한 퍼멀로이 박막의 자화용이축 방향을 나타내었다. 기판위에 자장을 가한 경우 Fig. 5(a)와는 달리 자화축의 방향이 보다 외부 자장의 방향을 따라서 정렬되어 있음을 알 수 있으며, 전체적인 자화용이축의 정렬은 자석간의 거리에 매우 민감한 함수임을 알 수 있다. 특히 Fig. 5(c)는 대부분의 지역에서 막대자석의 자화방향을 따라서 자화용이축이 정렬되어 있음을

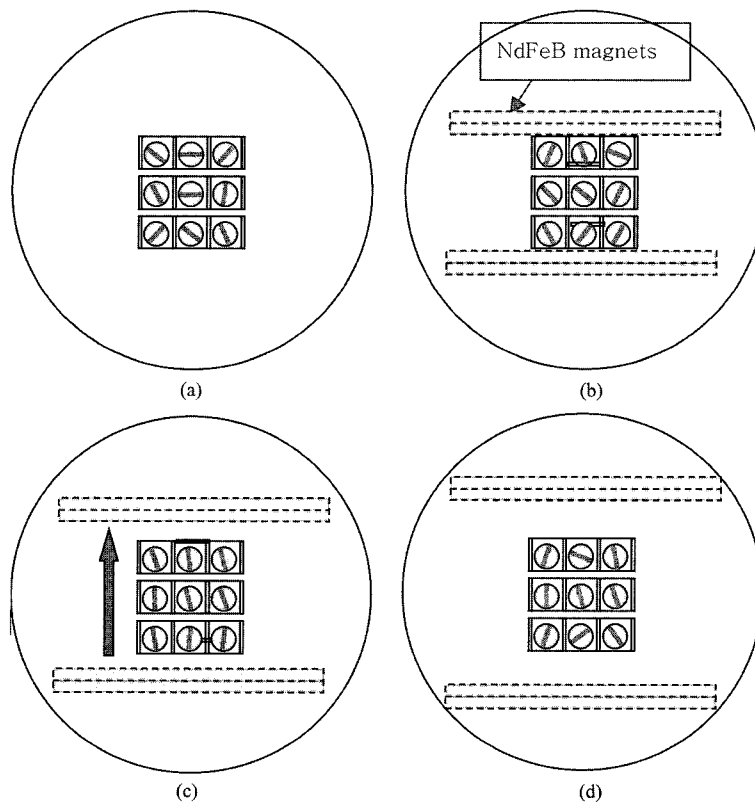


Fig. 5. Easy axis of magnetic field at Si substrate. (a) Before magnets installation, (b) After magnets installation (48 mm), (c) After magnets installation (70 mm) (d) After magnets installation (85 mm).

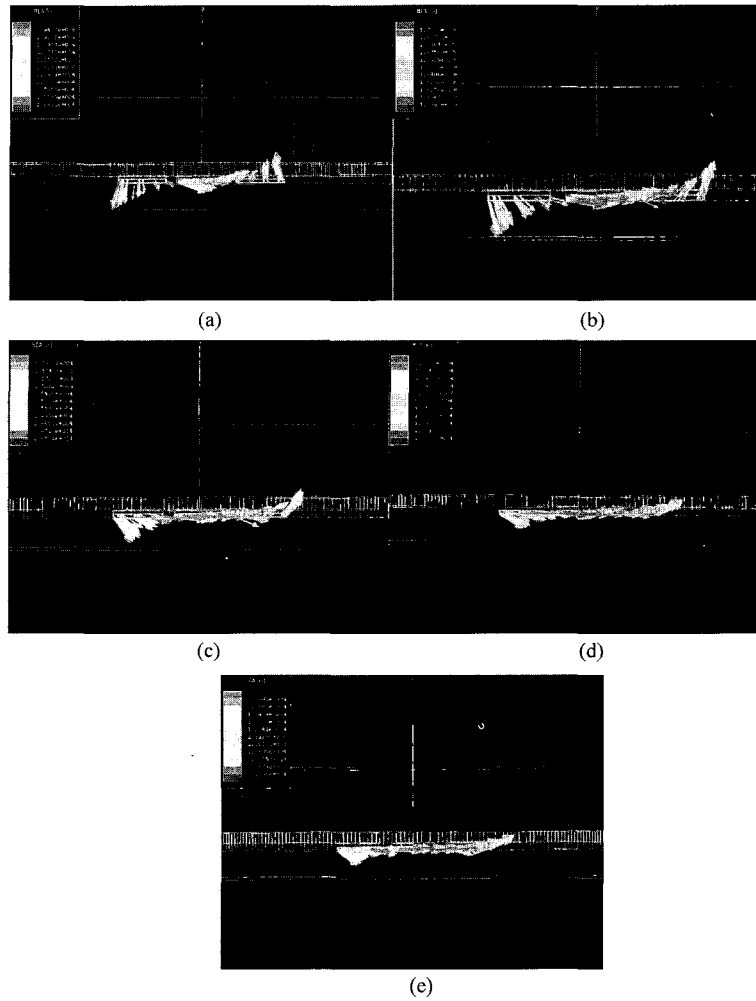


Fig. 6. Magnetic field of NdFeB magnets at substrate. (a) 48 mm (ditance of NdFeB magnets), (b) 60 mm, (c) 70 mm, (d) 80 mm, (e) 85 mm.

알 수 있다. 이러한 결과는 영구자석으로 자화방향을 조절할 수 있음을 나타내며 박막증착시 최적의 조건을 얻기 위한 정확한 자장의 분포 및 세기에 대한 정보가 필요하다.

Fig. 6은 rf 마그네트론 스퍼터링전 기관위에 NdFeB 자석을 장착(48, 60, 70, 80, 85 μmm)하였을 경우 발생하는 누설 자장의 방향과 크기를 기관 중심축에 대하여 표시한 그림이다. 그림에서 관찰되듯이 자석간 거리가 증가함에 따라서 평행한 자성분포가 기관 중심부의 넓은 범위로 확대되어지며, 특히 자석간 거리가 70 mm 이상의 경우 코아내부에 대체로 평행한 자장이 형성된다. Fig. 7는 기관 중심에 걸리는 자장의 크기를 표시한 그림으로 자석간 거리가 48 mm일때 가장 큰 값(230 Oe)에서 점차 감소하여 85 mm 경우 120 Oe까지 감쇄하였으며 자장의 방향이 70 mm 이상의 경우 자속의 방향과 일치하고 있다. 퍼멀로이 박막은 일반적으로 매우 연자성 특성이 우수하여 보자력 및 자기 이방성 상수가 작아 자장의 세기 100 Oe 정도 이상에서 자화 용이축이 조절이 가능

한 것으로 알려져 있으므로 현재의 누설자장의 크기와 방향은 충분한 것으로 판단되나, 실제의 자성박막의 성막시 장비에 장입되어 있는 마그네트에 의한 누설자장이 영향에 대한 평가가 필요하다.

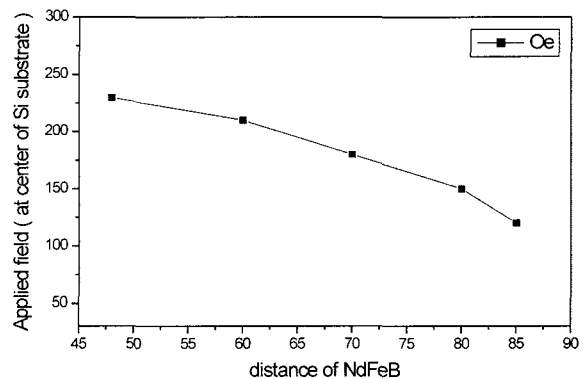


Fig. 7. Magnification of magnetic field at Si substrate center.

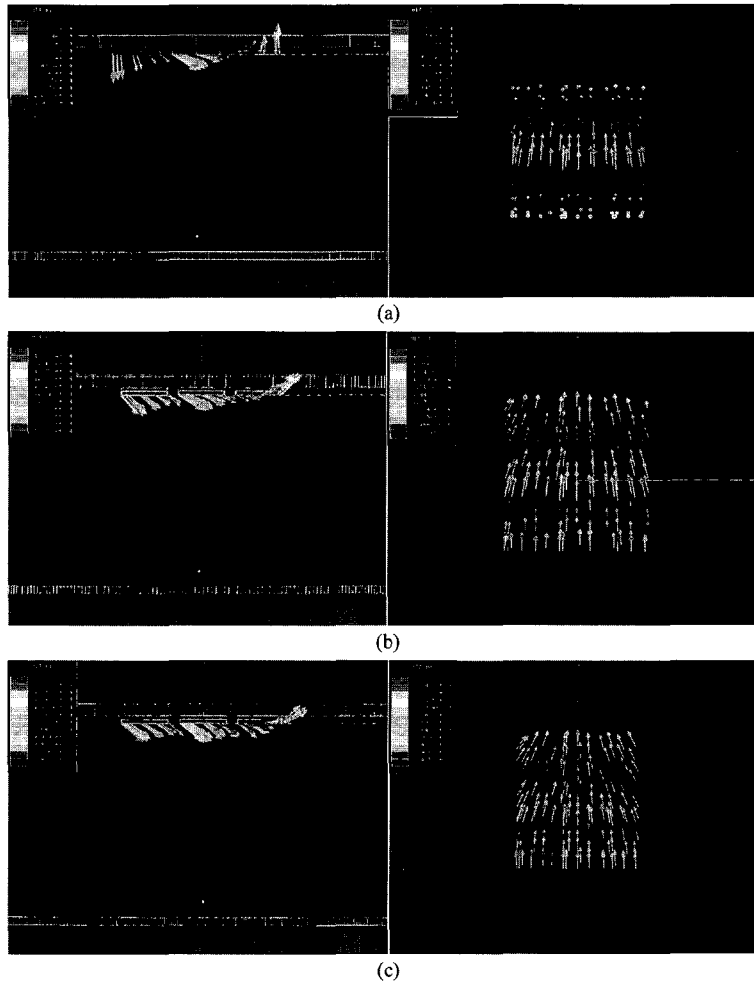


Fig. 8. Magnetic field of NdFeB magnets at substrate at rf magnetron sputtering. (a) 48 mm (distance of NdFeB magnets), (b) 70 mm, (c) 85 mm.

NdFeB 자석을 장착시킨 기판을 rf 마그네트론 스퍼터링으로 증착했을 경우의 자석간 거리(48, 70, 85 mm)에 따른 자장의 방향을 측면과 상단면에서 관찰한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 6과 비교하여 자성의 방향이 보다 타겟 방향으로 향하고 있음을 알 수 있으며, 기판자체의 NdFeB 자석간 거리에 따른 자장의 방향 (자화용이축)은 자석사이 거리가 70 mm 이상의 거리에서 자장이 선형적으로 변경되며, 85 mm 이상의 거리에서는 자장의 세기가 감소하였으며, 자장의 방향도 장비의 자성효과에 의하여 타겟방향으로 보다 회전되어 있음을 알 수 있다. 따라서 막대자석의 거리가 멀어질 경우 시료에 걸리는 자장의 세기가 50 Oe 이하로 감소하는 지역이 발생하고, 동시에 자장의 분포가 평행하지 않은 분포로 인하여 이러한 지역에서의 자장의 방향은  $H_k$ 가 큰 재료의 경우 원하는 방향으로 정렬되지 못할 것으로 생각된다. 이러한 자장의 변화는 Fig. 5의 결과와 비교하여 매우 일치된 결과를 나타낸다. 따라서 보다 정확한 자화용이축의 정렬을 위해서는

정확한 자장의 분포에 대한 해석이 필요하며, 또한 막대자석의 초기 누설자속의 방향을 시편과 평행한 방향으로 유도하기 위한 치구의 사용이 필요하다고 생각된다.

#### IV. 결 론

자기이방성은 자기변형과 함께 연자기 박막의 투자율과 보자력에 큰 영향을 미친다. 특히 박막인터터와 같은 자기소자에서 고주파 특성을 향상시키기 위해서는 자기이방성을 잘 조절해야 한다. 따라서 자기코어용 연자성 박막을 증착할 때 이를 고려하여 증착하여야 하기 때문에 이를 위해 박막증착시 NdFeB 자석을 기판부위에 설치하여, 약 2 kG 정도의 세기를 갖는 NdFeB 영구자석의 누설자속과 시뮬레이션을 통한 검증 을 이용하여 자화용이 및 곤란축의 방향을 조절할 수 있었으며, NdFeB 자석간 70 mm에서 기판 중심에까지 걸리는 자장의 세기 180 Oe의 가장 강한 세기의 자장의 방향이 Si 기판

상에서 수평이 되는 조건을 찾을 수 있었다. 한편, 퍼멀로이의 자기적 특성은 기판과 타겟간 거리는 5 cm, 투입전력변화 (200, 300, 400, 450 W) 및 박막 두께 변화(0.5  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$ )에 따른 자기적 특성, 즉 5000 Å에서 3000 이상, 1  $\mu\text{m}$ 에서 2500, 2  $\mu\text{m}$ 에서 2000, 3  $\mu\text{m}$ 에서 1500 이상의 투자율값과 포화자화 값은 10~12 kG, 보자력은 0.2~1 Oe, 비저항은 20  $\mu\Omega\text{cm}$ 의 값을 얻을 수 있었다.

### 감사의 글

이 논문은 한양대학교 교내 연구비로 시행되었음.

### 참 고 문 헌

- [1] H. Watanabe, H. Saito and M. Takahashi, 日本應用磁氣學會誌, 191(1993).
- [2] T. Chou, M. Igarashi and Y. Narumiya, 日本應用磁氣學會誌, 197(1993).
- [3] 윤의중, 김좌연, 박노경, 김상기, 김종대, "DC-DC Converter용 자성박막 인덕터 설계에 관한 연구", Journal of the Korea Institute of Electric Material Engineering, **14**(1), 74, 75(2001).
- [4] Y. Yoshizawa, S. Oguma and K. Yamauchi, J. Appl. Phys., **56**, 6044(1984).
- [5] K. Suzuchi, M. Kikuchi, A. Makino, A. Inoue and T. Masamoto, Mater. Trans. JIM, **32**, 961(1991).

## Influences of Nd-Fe-B Magnets on the Magnetic Anisotropy Direction of Permalloy Thin Films Fabricated by rf Magnetron Sputtering

Y. H. Lee\*, K. H. Kim and J. Kim

*Department of Metallurgy and Materials Engineering College of Engineering Sciences, Hanyang University  
Ansan, Kyunggi-do, 425-791, Korea*

(Received 13 October 2001, in final form 22 April 2002)

Permalloy thin films fabricated by rf magnetron sputtering showed the excellent magnetic properties, i.e., an effective permeability of over 2000 at 1  $\mu\text{m}$  thick up to 10 MHz, a saturation magnetization of 10~12 kG, a coercive force of 0.2~1 Oe, resistivity ( $\rho$ ) is 20  $\mu\Omega\text{cm}$ . In order to control the magnetic anisotropy direction of the films in a wafer scale, two parallel Nd-Fe-B permanent magnets were used to provide the magnetic field during the sputtering process. As a result, the anisotropy direction was successfully controlled when the two magnets were separated with a distance of 70 mm. 3D simulation of the magnetic fields around the wafer during sputtering were in accord with the above result.

**Key words** : 3D simulation, magnetic anisotropy, high permeability, permalloy