

논문 2007-44SD-2-1

모양으로 유도된 자기 이방성을 가진 Ni₈₀Fe₂₀/SiO₂ 다층막의 자기적 성질

(Magnetic Properties of RF Diode Sputtered Ni₈₀Fe₂₀/SiO₂
Multilayers)

윤 의 중*, 정 명 희**

(Eui-Jung Yun and Myunghee Jung)

요 약

본 연구에서는 모양으로 유도된 자기 이방성을 가진 Ni₈₀Fe₂₀/SiO₂ laminates 다층막의 자기적 성질을 조사 하였다. 다층막은 rf 다이오드 스퍼터링 시스템을 이용하여 개개의 Ni₈₀Fe₂₀ 와 SiO₂ (at%) 합금 타겟들로부터 Si 또는 upilex 기판에 적층하였다. 여러 가지 개수(N)의 이중층으로 구성된 Ni₈₀Fe₂₀/SiO₂ laminates 가 적층되었다. 사진식각기술을 사용하여 타원형 어레이 패턴을 가진 Ni₈₀Fe₂₀/SiO₂ laminates 가 제작 되었다. 자기적 성질은 B-H 히스테리시스 그래프와 고주파 permeameter를 사용하여 상온에서 측정 되었다. 다층막에서 도메인 reversal 시 발견된 몇 개의 스텝들은 자성체 박막 사이에 존재하는 coupling 때문으로 사료된다. 내재하는 intrinsic 일축 자기 이방성 field는 N이 증가하면 증가한다. 전체 자기 이방성 field의 실험값은 계산된 값과 잘 일치 하였다. 본 연구에서는 소형의 타원형 어레이를 가진 다층막의 laminate 구조체를 이용하여 더 큰 일축 자기 이방성을 유도하고 그 결과 laminate의 동작 주파수를 극대화시키고자 하였다.

Abstract

This study investigated the magnetic properties of Ni₈₀Fe₂₀/SiO₂ laminates with shape-induced magnetic anisotropy. The multilayer films were deposited on Si or upilex substrates, from separate Ni₈₀Fe₂₀ and SiO₂ (at %) alloy targets using a rf diode sputtering system. Ni₈₀Fe₂₀/SiO₂ laminates with a various number of bilayers (N) were prepared. The laminates with ellipse array patterns were prepared using photolithographic technique. The magnetic properties were measured at room temperature using a B-H hysteresisgraph and a high frequency permeameter. The several steps during domain wall reversal were observed in multilayer films, attributing to inter-magnetic layer coupling. Intrinsic uniaxial anisotropy field increases with N. The experimental values of the total anisotropy field are found to be in good agreement with the calculated values. This study utilized the shape anisotropy of the laminated film objects with small ellipse array patterns to induce a larger uniaxial anisotropy so as to maximize their operating frequency.

Keywords : NiFe/SiO₂ multilayers, laminated film objects, shape anisotropy, inter-magnetic layer coupling.

I. 서 론

최근에 기존의 정보통신 시스템을 소형화 하고 더 안정화시키기 위해 잡음 필터, 자기센서, 박막 인덕터 및 박막 변압기 등의 고성능 소형 자기소자들이 요구되고 있다. 연자기 층(soft-magnetic layers)과 비자기 절연 층으로 이루어진 자기 laminates 구조는 MHz-GHz 주파수 영역에서 eddy 전류손실을 줄이므로 고성능 소형

* 정희원, 호서대학교 정보제어공학과
(Department of Information and Control Eng.,
Hoseo University)

** 정희원, 안양대학교 디지털미디어공학과
(Department of Digital Media Eng., Anyang
University)

※ 이 논문은 2005년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구입니다. (과제번호: 20050217).

접수일자: 2006년9월14일, 수정완료일: 2006년12월12일

자기 소자를 제작하는데 효율적이라고 알려지고 있다 [1]-[4]. 이러한 laminates에서는 동작 주파수를 증가시키기 위하여 더 큰 일축 이방성(uniaxial anisotropy)이 요구되고 있다. 또한 모양에 의해 유도된 자기 이방성은 일축 이방성을 조절하는 중요한 수단이 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 모양에 의해 유도된 자기이방성을 가진 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{SiO}_2$ laminates의 자기적 성질을 연구하였다. 본 연구의 목적은 MHz-GHz 주파수 영역에서 사용 가능한 최적의 laminate 박막 층을 연구하는 것이다.

II. 실험

다층 박막 층은 rf 다이오드 스퍼터링(sputtering) 시스템을 이용하여 두개의 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 와 SiO_2 합금 target들로부터 1인치 직경의 Si 또는 upilex plastic 기판위에 적층되었다. 시스템의 base 압력은 2×10^{-7} torr 정도이었고 스퍼터링 기간 동안의 Ar 압력은 10 mtorr 이었다. 여러 개수의 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{SiO}_2$ 단위의 이중 박막 층을 가진 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{SiO}_2$ laminate들이 준비되었다. 여러 가지 종류의 NiFe 대 SiO_2 박막 층 두께 비를 사용하여 실험이 진행되었고, 가장 안정된 성질을 나타내는 최적의 두께 비를 결정 하였다. 그 결과 이중 박막 층에서 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 과 SiO_2 의 두께는 각각 128 nm와 50 nm로 고정시켰다. 다층박막은 기판온도가 상온일 때 적층하였다. 200 Oe 정도 크기의 기판 표면상의 bias 자기장을 laminate 박막 층이 적층될 때 인가 하였다.

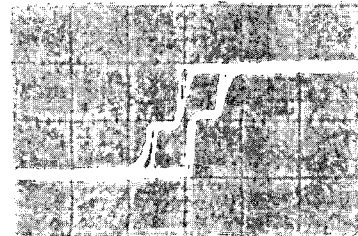
모양으로 유도되는 자기 이방성이 다층박막 층의 자기적 성질과 고주파수 응답특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 반도체공정인 사진 식각 기술을 사용하여 타원형 어레이(array) 패턴을 가진 laminate를 제작하였다. NiFe 박막 층 식각용으로 50ml HCl + 50ml HNO_3 + 50ml HCl DI Water 식각용액을 사용하고, SiO_2 박막 층 식각용으로 완충용 HF(buffer HF) 식각용액을 사용하였다. NiFe 박막 층의 최적의 식각시간(21.5 sec)은 식각용액 안에서 NiFe 박막 층이 식각되는 것을 눈으로 확인 하면서 결정 하였고 SiO_2 의 식각시간(~1분)은 참고문헌 [5]에서 얻은 $0.11 \mu\text{m}/\text{분}$ 의 식각률을 기반으로 결정하였다.

laminated된 다층박막 층과 타원형 모양을 가진 laminate된 다층박막 층의 자화(M_s)와 coercive force (H_c) 등은 저 자장(low magnetic field) B-H hysteresis-graph (100 Oe 미만의 동작 자장)와 진동샘플 마그네토미터 (vibrating sample magnetometer;

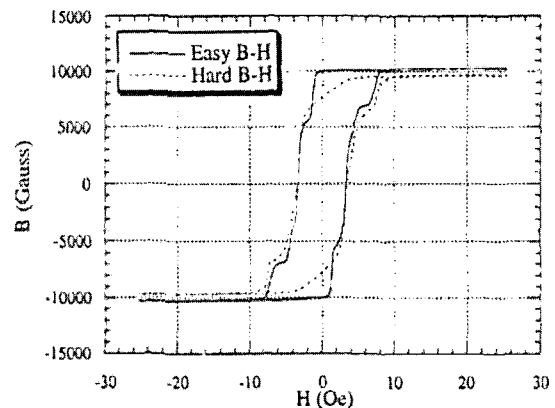
VSM)을 사용하여 상온에서 측정하였다. 또한, 다층박막 층의 고주파수 응답특성은 고주파수 permeameter^[6]로 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

그림 1은 Si 기판위에 적층한 $2 \times (128 \text{ nm Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/50 \text{ nm SiO}_2)$ 또는 $6 \times (128 \text{ nm Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/50 \text{ nm SiO}_2)$ 다층박막 층의 히스테리시스 루프 특성을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 다층박막 층에서 도메인 reversal 시 몇 개의 스텝들이 발견되었는데 이는 서로 다른 H_c 값이 존재하기 때문에 자성체 박막 사이에 존재하는 coupling 때문으로 사료된다. Bias 자기장 방향에 수평(수직)한 축은 easy(hard) 축 이었는데 이는 B-H 히스테리시스 루프를 minor 루프로 작게 만들면서 확인 하였다. 그림 1에서 나타낸 대로 $4 \times (128 \text{ nm Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/50 \text{ nm SiO}_2)$ 다층박막 층의 B-H 히스테리시스 루프 특성과 $6 \times (128 \text{ nm Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/50 \text{ nm SiO}_2)$ 다층박막 층의 B-H 히스테리시스 루프 특성은 유사하였다.



(a)



(b)

그림 1. (a) $2 \times$ 와 (b) $6 \times (128 \text{ nm Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/50 \text{ nm SiO}_2)$ 다층박막 층의 대표적인 B-H 루프; (a)에서 $x=20 \text{ Oe/div}$, $y=10 \text{ nWb/div}$.

Fig. 1. Typical B-H loops of (a) $2 \times$ and (b) $6 \times (128 \text{ nm Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/50 \text{ nm SiO}_2)$ multilayer films; in (a) $x=20 \text{ Oe/div}$, $y=10 \text{ nWb/div}$.

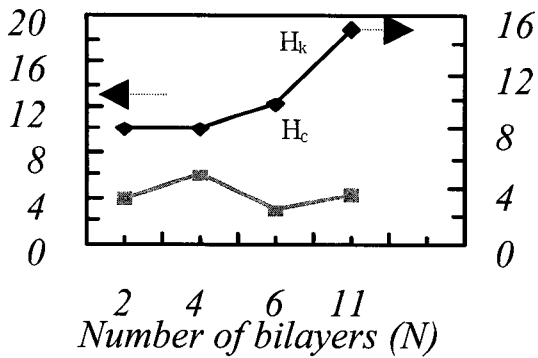


그림 2. 이중 박막 층의 적층 수(=N)에 따른 다층박막 층의 자기적 성질 [H_c 와 H_k (intrinsic 일축 자기 이방성 field)]의 변화

Fig. 2. Magnetic properties of the multilayer films as a function of a number of bilayers (=N).

$Ni_{80}Fe_{20}/SiO_2$ 단위의 이중 박막 층의 적층 수(=N)에 따른 다층박막 층의 자기적 성질 [H_c 와 H_k (intrinsic 일축 자기이방성 field)]의 변화는 그림 2에 나타나 있다. 그림에 보인 대로 H_k 는 N이 증가 할수록 증가 하였으나 H_c 는 N이 증가해도 별로 변화가 없었다. 또한 모든 다층박막 층은 ~10 kG의 자화 값을 나타내었다.

자기장 적층 bias 나 비스듬하게 경사진 vapor 입사 방법에 의하여 유도 될 수 있는 일축 자기이방성 field 가 40 Oe 이상이 될 수 있다는 연구결과가 지금 까지도 보고되어 지고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 소형의 타원형 어레이 패턴을 가진 다층박막의 laminate 구조체의 모양 이방성(shape anisotropy)을 이용하여 더 큰 일축 자기 이방성을 유도하고 그 결과 laminate의 동작 주파수를 극대화시키고자 하였다. 타원형 어레이 패턴의 장축(long axis) 방향을 다층박막의 easy 축과 평행하게 하여 모양 효과(shape effect)를 극대화 하도록 하였다.

그림 3은 $6 \times (128 \text{ nm } Ni_{80}Fe_{20} / 50 \text{ nm } SiO_2)$ 다층박막 타원 어레이 패턴(긴 easy 축= $e=120 \mu\text{m}$, 짧은 hard 축= $h=68 \mu\text{m}$)들의 대표적인 B-H 루프와 사진을 나타내고 있다. 사진은 100배로 확대 되었고 타원 어레이 패턴의 밀도는 33% 이었다. 일반적으로 laminate 된 타원면의 총 자기 이방성 field H_{an} 은 H_k (intrinsic 일축 자기 이방성 field)와 H_s (모양 이방성 field)의 합으로 다음과 같이 표현될 수 있다^[7].

$$H_{an} = H_k + H_s \quad (1)$$

또한

$$H_s = (D_h - D_e) M'_s \quad (2)$$

여기서 H_s 는 평균 자화 $M'_s = [t_m / (t_m + t_{nm})] M_s$ 에 의존하고 D_e (easy 축 모양 이방성 인자)와 D_h (hard 축 모양 이방성 인자)에도 의존 한다. 또한 여기서 t_m 와 t_{nm} 는 각각 개개의 자성체 박막과 비자성체 박막의 두께를 의미 한다. 평평한 타원면의 경우 ($e, h \gg$ 총 laminate 두께), 모양 demagnetizing 인자 (shape demagnetizing factor) 는 easy 축 크기(e)와 hard 축 크기(h)에 관하여 근사적으로 표현이 가능하다. oblate 타원면의 경우 ($e > h$) 다음과 같은 표현 식을 얻을 수 있다^[7].

$$H_s = \frac{3}{2} \frac{\pi}{4} \left(\frac{N \times t_m}{h} \right) \left(1 - \frac{h}{e} \right) M_s \quad (3)$$

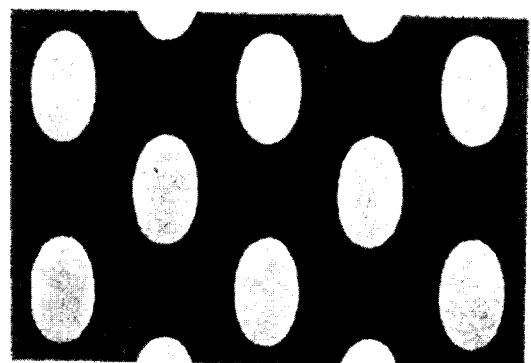
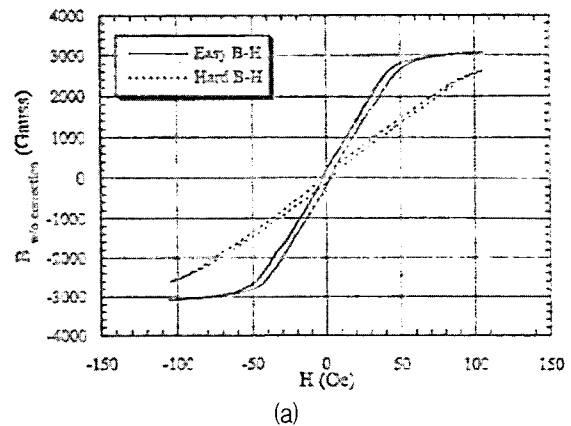


그림 3. $6 \times (128 \text{ nm } Ni_{80}Fe_{20} / 50 \text{ nm } SiO_2)$ laminate된 타원 어레이의 (a)대표적인 B-H 루프와 (b)사진; (b)에서 긴 easy 축 $e=120 \mu\text{m}$, 짧은 hard 축 $h=68 \mu\text{m}$, 배율=100, 타원 중심과 중심사이 거리 = $200 \mu\text{m}$.

Fig. 3. (a)Typical B-H loops and (b) photographs of $6 \times (128 \text{ nm } Ni_{80}Fe_{20} / 50 \text{ nm } SiO_2)$ laminated ellipse arrays; in (b) long easy-axis $e=120 \mu\text{m}$, short hard-axis $h=68 \mu\text{m}$, magnification = 100, center to center= $200 \mu\text{m}$.

표 1. 측정된 H_{an} 값과 식(1) - (3)을 이용하여 계산된 H_{an} 값의 서로 비교

Table 1. Comparison of the measured H_{an} values to the values calculated from (1) through (3).

Sample	Measured H_{an} (Oe)	Calculated H_{an} (Oe)
2x(NiFe/ SiO_2)	46	44
4x(NiFe/ SiO_2)	56	53
6x(NiFe/ SiO_2)	68	64
20x(NiFe/ Si)	110	100

여기서 N은 이중 박막 층의 적층 수이다. 단축 방향으로 자화가 형성되는 induced 이방성의 경우 $h > e$ 가 되고 e와 h가 식(2)에서 바뀌게 된다. 이 경우 $D_e > D_h$ 이 되고 reverse 도메인이 박막 가장자리에서 발생하여 easy 축 demagnetizing field를 무력화 시키게 되고 식(2)에서 $D_e M'_s = 0$ 이 된다.

표 1은 측정된 H_{an} 값과 식(1) - (3)을 이용하여 계산된 H_{an} 값을 서로 비교하고 있다. 표 1. 에서 알 수 있듯이 측정된 H_{an} 값과 계산된 H_{an} 값은 서로 잘 일치하고 있어서 식(3)은 H_{an} 값을 예측하는데 큰 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

laminated된 다층박막 층의 LC 공진주파수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f_{LC} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4)$$

여기서 LC는 다음과 같이 표현된다^[8].

$$LC = \mu \left(\frac{t_m}{t_m + t_{nm}} \right) \frac{e \cdot t_m}{h} \left(\epsilon \frac{e \cdot h}{t_{nm}} \right) \quad (5)$$

식(4)-(5)로부터

$$f_{LC} = \frac{\sqrt{(t_m + t_{nm}) \cdot t_{nm}}}{2\pi \cdot e \cdot t_m \sqrt{\mu\epsilon}} \quad (6)$$

을 얻는다. 이 때 $t_m = 128 \text{ nm}$, $t_{nm} = 50 \text{ nm}$, $e = 25.4 \times 10^{-3} \text{ m}$ 라 가정(laminated된 다층박막 층 전체를 $e = 1 \text{ inch}$ 로 된 하나의 타원체로 가정)하고 이를 식(6)에 대입하면

$$f_{LC} = \frac{1.39 \times 10^9}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (7)$$

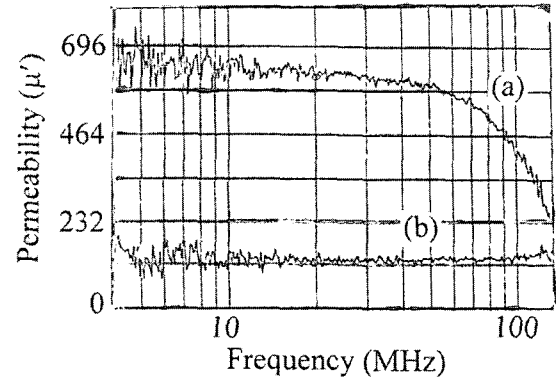


그림 4. 6x(128 nm $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/ 50 \text{ nm SiO}_2$)로 laminated된 (a)박막과 (b) 타원체에 대한 고주파 투자율(μ') 스펙트럼

Fig. 4. High frequency permeability (μ') spectra for 6x(128 nm $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/ 50 \text{ nm SiO}_2$) (a) laminated films and (b) laminated ellipse object.

을 얻는다. 여기서 μ_r 와 ϵ_r 은 각각 개개의 자성체 박막의 투자율 상수와 개개의 비자성체 박막의 유전율 상수를 의미 한다.

6x(128 nm $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/50 \text{ nm SiO}_2$) laminate 된 다층박막 ($e = 25.4 \times 10^{-3} \text{ m}$) 과 6x(128 nm $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/50 \text{ nm SiO}_2$) laminate 된 타원 어레이 ($e = 80 \times 10^{-6} \text{ m}$) 들의 투자율의 고주파 응답을 그림 4에서 서로 비교하고 있다. 그림 4에서 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{SiO}_2$ laminate 된 다층박막의 경우 $f = 30 \text{ MHz}$ 정도에서 permeance 스펙트럼의 감쇄(roll-off)현상이 발견 되었으나, $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{SiO}_2$ laminate 된 타원 어레이의 경우 $f = 200 \text{ MHz}$ 까지 감쇄현상이 발견되지 않았다. 따라서 이 결과로부터 모양 이방성 때문에 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/ \text{SiO}_2$ laminate된 박막에서 발견되는 permeance 스펙트럼의 감쇄현상이 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{SiO}_2$ laminate된 타원 어레이에서 더 높은 주파수로 shift되는 이점을 확인 할 수 있다. permeance 스펙트럼의 감쇄현상이 발생하기 시작하는 주파수 $f = 30 \text{ MHz}$ 는 앞서 유도된 식(7)과 그림 4의 (a)에서 얻은 μ_r 을 사용하여 계산된 LC 공진 주파수(=30 MHz)와 일치하였다. 이로부터 permeance 스펙트럼의 감쇄현상은 LC 공진 주파수인 30 MHz 근처에서 permalloy 박막사이에 흐르는 displacive 전류 효과 때문에 발생한다고 추정할 수 있다. 또한 그림 4로부터 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 자성체 박막이 작은 타원 어레이 패턴들로 바뀌면서 투자율의 값이 감소되는 것을 알 수 있는데 이는 자성체 재료의 volume이 감소하면서 생기는 현상으로 타원 어레이 패턴의 밀도를 증가(타원의 e 값

을 증가) 시키면 투자율도 증가 시킬 수 있으나 식(6)으로부터 μ_c 가 감소하여 고주파 특성이 나빠진다. 이러한 투자율과 공진주파수 사이의 반비례관계 때문에 허용 가능한 투자율과 공진주파수를 얻을 수 있는 최적의 e 값을 결정하는 것이 중요하다.

IV. 요약 및 결론

다층박막 층에서 도메인 reversal 시 발견된 몇 개의 스텝들은 서로 다른 H_c 값이 존재하기 때문에 자성체 박막 사이에 존재하는 coupling 때문으로 사료된다. H_k 는 N 이 증가 할수록 증가 하였다. 본 연구에서는 소형의 타원형 어레이 패턴을 가진 다층막의 laminate 구조체를 이용하여 더 큰 일축 자기 이방성을 유도하고 그 결과 laminate의 동작 주파수를 극대화시키고자 하였다. 측정된 H_{an} 값과 식(3)으로부터 계산된 H_{an} 값은 서로 잘 일치하고 있어서 식(3)은 H_{an} 값을 예측하는데 큰 역할을 한다는 것을 알 수 있었다. 모양 효과가 $Ni_{80}Fe_{20}/SiO_2$ laminate된 박막의 고주파 특성을 향상 시킨다는 사실로부터 $Ni_{80}Fe_{20}/SiO_2$ laminate된 박막을 타원 어레이로 패턴 화 시키는 것이 고 주파수에서 Eddy 전류 손실을 줄이는데 더 효율적이라고 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] J. S. Y. Feng and D. A. Thompson, "Permeability of narrow permalloy stripes," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 13, pp. 1521-1523, 1977.
- [2] M. Senda and O. Ishii, "High frequency magnetic properties of CoFe/SiO₂ multilayer film with the inverse magnetostrictive effect," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 30, pp. 155-158, Jan. 1994.
- [3] S. G. Kim, Eui-Jung Yun, J. Y. Kim, J. D. Kim, and K. I. Cho, "Microfabrication and characteristics of double-rectangular spiral type thin-film inductors with an upper NiFe magnetic core," *J. Appl. Phys.*, vol. 90, pp. 3533-3538, 2001.
- [4] Eui-Jung Yun, M. H. Jung, C. I. Cheon, and H. G. Nam, "Microfabrication and characteristics of low-power, high-performance magnetic thin film transformers," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, no. 1, pp. 65-70, 2004.
- [5] J. L. Vossen and W. Kern, *Thin Film Processes*, New York: Academic, 1978, pp. 437.
- [6] C. A. Grimes, P. Trouilloud, and R. M. Walser, "A new swept-frequency permeameter for measuring the complex permeability of thin magnetic films," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 24, pp. 603-610, 1988.
- [7] R. M. Walser, "A Study of Thin Film Magnetodielectrics" Ph.D. Dissertation, University of Michigan, 1968.
- [8] R. M. Walser and A. P. Valanju, "Displacement eddy currents in magnetic laminates," *IEEE Trans. Magn.* vol. 28, pp. 2280-2282, September 1992.

저 자 소 개



윤 의 중(정회원)

1985년 2월 고려대학교
전자공학과 졸업(공학사).
1988년 12월 미국 University of
Texas at Austin 전기공
학과 졸업 (공학석사).
1994년 5월 미국 University of
Texas at Austin 전기공
학과 졸업 (공학박사).

1994년 6월~1996년 8월 미국 University of
Texas at Austin 부설 Center for
Magnetics Post-Doctor 연구원.

2004년 9월~2005년 8월 미국 University of
Texas at Austin, 나노입자 개발
연구센터, 교환교수.

1996년 9월~현재 호서대학교 정보제어공학과
부교수.

<주관심분야 : 고주파(RF) 수동 부품용 자성박막
(또는 Chip) 인덕터 및 변압기 설계 및 제작 연구,
고주파(RF)용 자성박막재료 개발, MEMS기술을
이용한 Si 압력센서 개발, PIN Diode Array를 이
용한 의료 영상기기 개발, 나노입자 자성체 합성
연구>



정 명 희(정회원)

1989년 2월 서울대학교 계산통계
학과 졸업(이학사).
1991년 12월 미국 University of
Texas at Austin
통계학과 졸업 (이학석사).
1997년 8월 미국 University of
Texas at Austin 산업공
학과 졸업 (공학박사).

1994년 1월~1997년 7월 미국 University of
Texas at Austin 부설 Center for Space
Research 연구원.

1997년 8월~1998년 2월 삼성 SDS 선임연구원.

1998년 3월~현재 안양대학교 디지털미디어
공학과 부교수.

<주관심분야 : 통신, 시뮬레이션, 영상처리, 원격
탐사영상 분석>