

## Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub> 박막 및 Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>/SiO<sub>2</sub> 다층박막의 고주파 자기특성

윤의중 · 진현준\* · 박노경\* · 문대철\* · 김좌연\*\*

호서대학교 전기전자제어공학부, 정보통신공학부\*, 재료화학공학부\*\*  
충남 아산시 배방면 세출리 산29-1, 336-795

(1998년 6월 29일 받음, 1998년 10월 14일 최종수정본 받음)

Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub> 단일박막층은 고진공 RF magnetron sputtering 장비를 이용하여 여러 가지 기판(glass, Si, polyimide) 위에 적층되었고 ~1000Å 두께를 가진 Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>박막은 우수한 고주파 자기특성을 나타내었다. 10×[100 nm Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>/100 nm SiO<sub>2</sub>] 다층 박막의 자화값은 예측된 값과 거의 일치하였으며 H<sub>m</sub>값(=124 Oe)도 예측된 30≤H<sub>m</sub>≤125 Oe 범위 내에 있음을 알 수 있었다. 자성 다층 박막의 자화율(=μ<sub>r</sub>=μ<sub>r</sub>-jμ<sub>i</sub>)의 주파수 특성은 자성 다층 박막과 도체로 이루어진 층상구조를 갖는 microstrip line을 network analyzer에 연결하여 전송 특성(S<sub>11</sub>, S<sub>21</sub> 파라미터)을 측정함으로써 얻어졌다. μ<sub>r</sub>'의 주파수 특성은 S-파라미터로 분석되는 magnetic absorption으로부터 얻어졌다. 또한 μ<sub>r</sub>'의 주파수 특성은 Kramers-Kronig 관계식을 사용하여 μ<sub>r</sub>'의 주파수 특성으로부터 계산되었다. 이와 같이 하여 얻어진 μ<sub>r</sub>'의 주파수 특성(static 자화율, 공진 주파수)은 계산에 의해서 얻어진 값들과 잘 일치된다는 것을 확인하였다.

### 1. 서 론

최근의 Silicon/GaAs 소자 집적기술의 눈부신 발전은 많은 저 비용의 고주파 무선 통신 기기를 가능케 하고 있으나 비자성 금속박막으로 이루어진 인덕터가 전체 회로면적의 60 %이상을 차지하여 통신기기의 소형 경량화에 큰 장애물이 되고 있다. 따라서 21세기를 겨냥하는 우수한 성능을 가진 소형 경량의 초고주파용 무선 통신 기기를 구현하기 위해서는 핵심소자인 고주파 영역에서 Eddy 전류 손실이 적고 극대화된 L, Q 값을 갖는 박막 인덕터와 voltage-controlled oscillator (VCO) 등을 제조하는데 고주파용 자성박막재료를 사용해야한다[1].

고주파용 자성재료는 0에 가까운 magnetostriction을 선호하며 GHz 동작을 필요로 하는 미소자성소자에 직접 응용이 가능하여야 한다. 지금까지 ferrite가 고주파 응용을 위해 자성재료로 널리 사용되어 왔으나[2] 10 MHz 이상의 주파수 영역에서 자화율이 급격하게 떨어져 최근에 GHz에서 동작하는 미소자성 소자에는 사용할 수 없다. 지금까지 알려진 이중원소들 중 가장 높은 자화(magnetization)를 갖는 CoFe 재료[3, 4]는 고주파 응용에 좋은 후보가 될 수 있으나 이에 대한 연구는 국내외적으로 아주 미미한 수준이다.

본 논문에서는 GHz 주파수에서 가능한 높은 자화율을 갖는 자성 박막 층을 비자성 절연 박막 층과 결합시

켜 다층구조로 된 고주파용 자성박막재료를 개발하였다. 본 논문에서 개발된 자성 다층 박막 재료는 MHz-GHz 주파수 응용에 사용되는 미소 자성 박막소자에 바로 활용이 가능하고, 박막 인덕터나 변압기를 이용한 소형의 전력원 제작을 통해 portable한 computer의 소형경량화에 크게 기여할 수 있다. 또한 본 논문은 GHz 자성 박막 소자를 Si 소자 회로에 함께 집적시킬 수 있는 최적의 공정기술, 설계기술, 그리고 특성 분석 기술 등을 제공하기 때문에 진보된 소형경량 인덕터의 개발에 크게 기여할 수 있으며 더 나아가 초고속/고주파수에서 동작하는 다른 자성소자들(스위칭 전력 공급 변압기, 박막으로 된 소형 noise filter, 자기센서, recording heads, 초고주파 부품 및 effective media, RF tags 등등)의 개발에 기초가 될 수 있다는 기대효과가 있다. 모든 고주파 무선 통신기기에 사용되는 VCO의 개발 제조에 기초가 될 수 있는 본 논문은 고주파 통신기기의 소형경량화에 크게 이바지 할 것으로 기대된다.

### 2. 실험

Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub> alloy 단일박막층은 Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub> (atomic %) alloy target (순도: 99.9 %)으로부터 RF magnetron sputtering 적층장비를 이용하여 적층 되었다. system의 base 압력은 2.2-5×10<sup>-7</sup> Torr였고, Ar 압력은 10-30 mTorr였다. ~1000 Å의 두께 (<δ<sub>min</sub>=1800 Å)를 가진 Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub> 단

일박막층은 glasses slides, Si wafer, poly- imide 등의 기판 위에 적층 되었다. 각 박막층은 상온에서 적층 되었고 적층도중 140-320 Oe의 평면방향으로 magnetic bias field가 가해졌다. 어떤 Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub> 박막층은 두 개의 독립된 Co(순도: 99.95 %) target과 Fe(순도: 99.95 %) target으로부터 기판을 회전시키면서 적층 되었고, 그 결과는 단일 Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub> alloy target으로 얻은 결과와 비교되었다. 박막층의 자성성질은 재료의 coercivity( $H_c$ )와  $H_{an}$  값의 상태에 따라 low field B-H hysteresis graph(drive field ≤ 100 Oe)나 VSM(Vibrating Sample Magnetometer)등을 사용하여 상온에서 측정되었고, 자성 박막재료의 상온 resistivity는 four-point probe를 이용하여 측정되었다.

Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>/SiO<sub>2</sub>로 이루어진 자성 다층 박막의 적층은 위에서 기술된 방법으로 양질의 자성 단일 박막층 (Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>; 두께 = 50~100 nm)을 적층하고 고진공상태를 유지한 후 시료를 SiO<sub>2</sub> target아래로 이동시킨 후 down sputtering 방식으로 적층 되었다. 이와 같은 방식으로 얻어진 Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>/SiO<sub>2</sub> bilayer를 고진공상태에서 10~20층 정도를 연속적으로 적층 시켰고, 그것의 자성 특성을 측정해 보았다.

자성 다층 박막의 자화율 주파수 특성은 자성 다층 박막과 도체로 이루어진 층상구조를 갖는 microstrip line을 network analyzer에 연결하여 전송특성(transmission characteristics;  $S_{11}$ ,  $S_{21}$ )을 측정하므로써 얻어졌다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 자성재료의 선택

자성재료의 공진 주파수가 1~5 GHz 정도가 되게 하기 위하여  $M_s \times H_{an}$  (여기서  $M_s$  = magnetization,  $H_{an}$  = anisotropy field) 곱이 최대가 되는 고주파 자성재료들을 문헌 조사와 computer simulation을 통해 선택하였다.

포화 자화( $M_s$ )를 갖는 자성물질이 높은 자화 성질을 유지할 수 있는 최대 주파수는 Snoek의 한계[5]에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$\mu_m(0) \cdot f_c = 2.8M_s \sqrt{\left(\frac{M_s}{H_{an}}\right)} \quad (1)$$

여기서

$$\mu_m(0) = \text{static 자화율} = \frac{M_s}{H_{an}} \quad (2)$$

$$f_c = \text{차단주파수 또는 ferromagnetic 공진 주파수} = 2.8\sqrt{H_{an} \cdot M_s} \quad (3)$$

$H_{an}$  = uniaxial anisotropy field.

(2), (3) 식으로부터 우리는 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\mu_m(0) = \left(\frac{2.8M_s}{f_c}\right)^2 \quad (4)$$

또한 (2), (4)식으로부터

$$H_{an} = \frac{1}{M_s} \left(\frac{f_c}{2.8}\right)^2 \quad (5)$$

를 얻는다. 따라서 고주파수 영역에서의 동작을 요구하는 미소 자성 소자를 실현하기 위해서는  $\mu_m(0) \cdot f_c$ 의 곱을 최대화시키는 자성박막재료의 개발을 필요로 한다. (1)식에서 알 수 있듯이 최대  $\mu_m(0) \cdot f_c$ 의 곱은 가장 높은  $M_s$ 와 가장 작은  $H_{an}$ 값을 만족시키는 ferromagnetic 금속물질로 얻어질 수 있다. 또한 RF자기장은 skin depth  $\delta$ 보다 얇은 층의 자성 재료에만 침투할 수 있으며 GHz 주파수에서는  $\delta$ 가 sub-micron 값을 갖게 되므로 강자성 박막 금속층을 사용해야만 한다. 이러한 강자성 박막 금속재료로는 다음과 같은 세 가지 종류가 있다[3, 4, 6].

- ① Co<sub>87</sub>Zr<sub>5</sub>Nb<sub>8</sub> ( $M_s = 11$  kGauss; 비정질),
- ② Co<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub> ( $M_s = 24.5$  kG),
- ③ Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub> ( $M_s = 19.3$  kG; polycrystalline).

이러한 박막재료들에 대한 Snoek's limit은 (4)~(5)식을 사용하여 얻어질 수 있고, 그 결과들은 Fig. 1에 비교되어 있다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 Co<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub> > Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub> > CoZrNb 순으로 Snoek's limit( $\mu_m(0) \cdot f_c$ 의 곱의 크기)이 감소함을 알 수 있다. 그러나 사용될 자

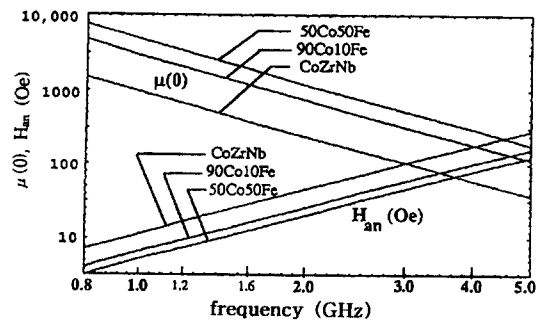


Fig. 1. Snoek's limit for Co-rich alloy thin films (Co<sub>87</sub>Zr<sub>5</sub>Nb<sub>8</sub>, Co<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub>, Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>).

성 박막 재료는 아주 작은 magnetostriction 값을 가져야 한다. 즉, 박막재료는 외부의 stress 변화에 따라 크기가 변하지 않고 거의 일정해야만 한다. 따라서 아주 큰 magnetostriction 값을 갖는  $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$ [3]은 좋은 재료가 될 수 없다. 대신에  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ 은 0의 magnetostriction을 가지며[6]  $f_c = 4.6$  GHz의 값을 가지므로 고주파용 자성재료로서 좋은 후보가 될 수 있다. 따라서 본 논문에서는  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$  박막 재료를 이용하기로 한다.

이러한 박막재료에 대한 주파수 응답은 다음과 같은 식에 의해서 얻어질 수 있다[7].

$$\mu = \frac{2.8M_s [2.8M_s + j\alpha f_{\text{MHz}}]}{[-(f_{\text{MHz}})^2 + (2.8)^2 M_s H_{an}] + j\alpha M_s f_{\text{MHz}}}$$

$$= \frac{2.8M_s [2.8M_s + j\alpha f_{\text{MHz}}]}{[-(f_{\text{MHz}})^2 + (f_c)^2] + j\alpha M_s f_{\text{MHz}}}$$
(6)

여기서  $f_c$ 는 (3)식에서 정의되어 진다.  $H_{an}$ 이 10, 30, 125 Oersted 일 때  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$  박막재료의 자화율( $\mu$ )-주파수( $f$ ) 특성은 (6)식을 이용하여 얻어질 수 있으며 그 결과는 Fig. 2에 나타나 있다.  $H_{an}$ 이 증가함에 따라  $\mu$ 는 감소하지만  $f_c$  값은 0.8 GHz에서 5 GHz로 증가한다. 본 논문에서는 ~2 GHz에서 박막 재료를 사용하기 원하므로  $30 \text{ Oe} \leq H_{an} \leq 125 \text{ Oe}$  사이의  $H_{an}$  값을 얻는 것이 바람직하다.

GHz주파수에서는  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$  박막재료 표면의 skin depth  $\delta$ 내에서만 자기장이 존재할 수 있다. 따라서 박막재료의 두께는 Eddy 손실을 줄이기 위해  $\delta$ 보다 작아야 한다.  $\delta$ 는 다음과 같이 표시 될 수 있다[3].

$$\delta = \sqrt{2\rho_m / (2\pi f_c \mu_m \mu_0)}$$
(7)

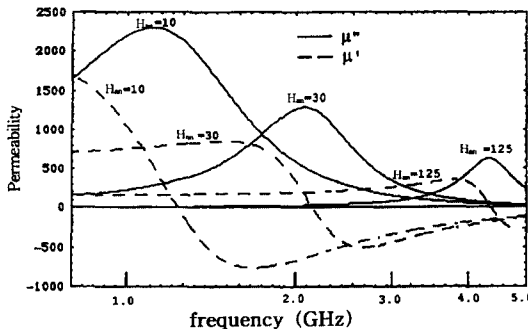


Fig. 2. Complex permeability ( $\mu$ )-frequency ( $f$ ) spectra computed from Eq. (6) for  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$  alloy films with  $M_s = 19.3$  kG and  $H_{an} = 10, 30, 125$  Oersteds in the 0.8 GHz-5.0 GHz range.

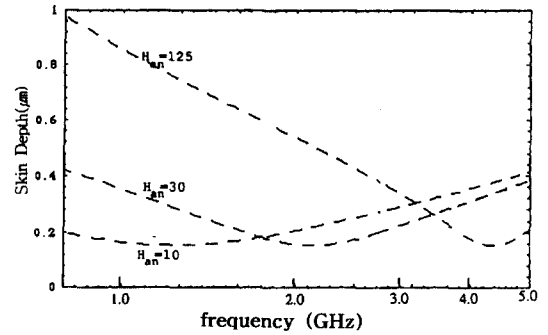


Fig. 3. Skin depth ( $\delta$ )-frequency ( $f$ ) characteristic computed from Eqs. (6) and (7) for  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$  alloy films with  $M_s = 19.3$  kG and  $H_{an} = 10, 30, 125$  Oersteds in the 0.8 GHz-5.0 GHz range.

여기서  $\mu_m$ 은 (6)식에서 정의된 자화율,  $\rho_m$ 은 자성박막층의 비저항을 나타낸다. (6)-(7)식을 이용하여  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ 의  $H_{an}$  값이 10, 30, 125 Oe 일 때  $\delta$ - $f$  특성은 쉽게 얻을 수 있고 그 결과는 Fig. 3에 나타나 있다. 이 결과에 의하면 최소 skin depth  $\delta_{min}$ 은 ~1800 Å이고 이 값은 주파수  $f$ 와  $H_{an}$ 의 값에 무관하게 일정하다는 것을 알 수 있다. 따라서  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$  박막 재료의 두께는  $\delta_{min} \sim 1800$  Å보다 작아야 한다.

### 3.2 자성 단일 박막층의 자성특성

Fig. 4는 ~1000 Å 두께를 가진  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ 의 대표적인 B-H loop 특성을 나타낸다.  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$  alloy target을 사용하여 얻은 B-H 특성[Fig. 4 (a)]는 두 개의 Co와 Fe target들을 사용하여 얻은 결과 [Fig. 4(b)]와 비슷했다. Table I은 이러한 두 가지 종류의  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$  단일층의 성질을 요약한다. Table II는 Fig. 4(a)에서 얻은 자성성질을 문헌상에 존재하는 bulk 값[4, 6]과 비교한 결과를 나타낸다. Table II에서 알 수 있듯이 본 논문에서 측정된  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$  단일박막층은 bulk에 비견할 만한 좋은 양질의 재료임을 알 수 있다. Table III은 Fig. 4(a)의 B-

Table I. Comparison of the magnetic properties obtained from Fig. 4. for two types of  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$  thin films

자성성질	$\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ Alloy Target	Co와 Fe targets
$M_s$ (Gauss)	19,003.3	19,660
$H_c$ (Oe)	24	22
$H_{an}$ (Oe)	32	23
Estimated $f_c$ (GHz)	2.18	1.88
estimated $\mu$	594	855
Resistivity ( $\mu\text{m-cm}$ )	14.5	18.4

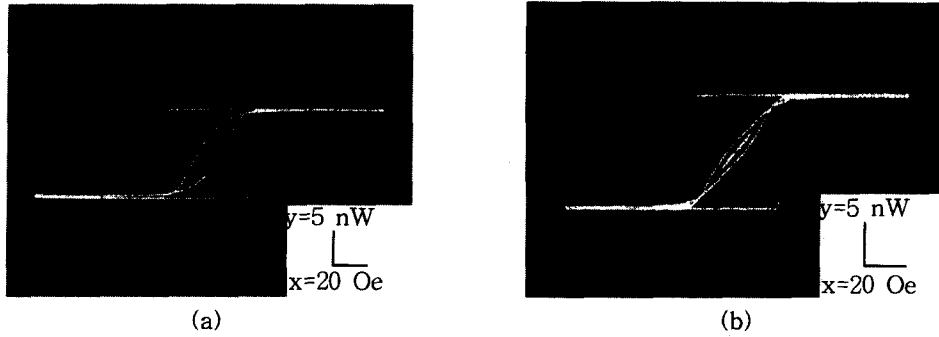


Fig. 4. Typical *B-H* loops of nominal 1000 Å thick Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub> films: (a) obtained from Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub> alloy target, (b) obtained from elemental targets of Co and Fe. Here,  $x=20$  Oe/div,  $y=5$  nW/div.

H 특성을 나타내는 박막을 적층할 때 사용된 중요한 parameter들을 요약하고 있다.

Fig. 5는 두 개의 서로 다른 기판(glass, polyimide) 위에 Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>을 적층하였을 때의 B-H 특성 및 그 성질들을

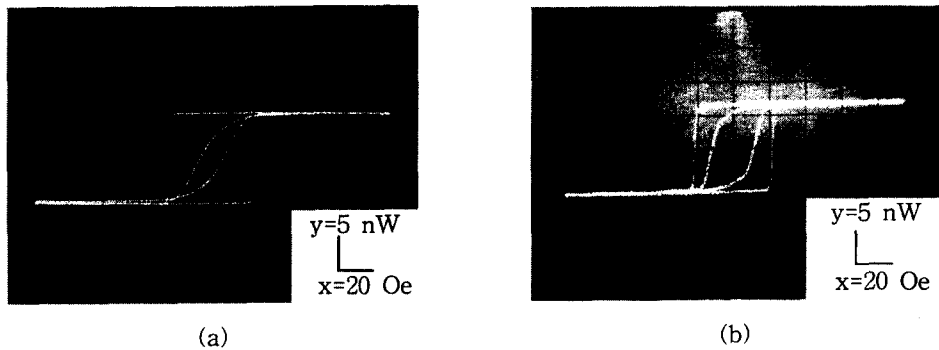
을 나타낸다. 이 결과로부터 우리는 glass 기판일 때 더 좋은 박막을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Table II. Properties of the Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub> thin from Fig. 4(a) compared with bulk  $M_s$ ,  $H_c$ ,  $H_{an}$ , and resistivity values

Parameters	측정된 값	문헌상의 값 [참고문헌 번호]
$M_s$ (Gauss)	19,003.3	19,300 [4]
$H_c$ (Oe)	24	20~30 [6]
$H_{an}$ (Oe)	32	30~35 [6]
Resistivity ( $\mu M$ -cm)	14.5	19 [4]

Table III. Summary of the important deposition parameters for the well-deposited Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub> thin films

Parameters	값
RF Power	1 kW
기판 전압	0 V
Base 압력	$5 \times 10^{-7}$ Torr
Pre-sputter	3분
Magnetic bias field	150 Oe
Ar 압력	10 mTorr
Deposition rate	275 Å/분
박막 두께	1100 Å
기판 온도	상온



성질	(a)박막재료	(b)박막재료
$M_s$ (Gauss)	19,003.3	18,346
$H_c$ (Oe)	24	22
$H_{an}$ (Oe)	32	35
Resistivity ( $\mu \Omega$ -cm)	14.5	15.8

(c)

Fig. 5. *B-H* characteristic of Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub> films deposited on (a) glass substrates and (b) polyimide substrates; (c) Comparison of the magnetic properties obtained from (a) and (b).  $x = 20$  Oe / div,  $y = 5$  nW / div in (a) and (b).

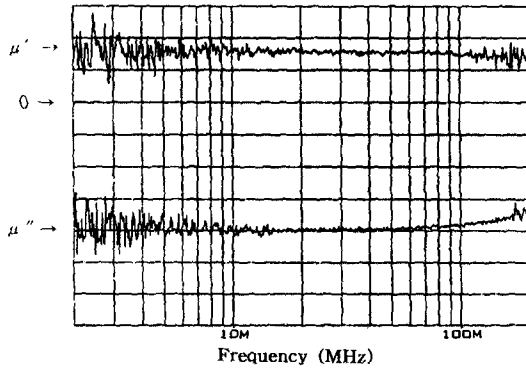


Fig. 6. Complex permeability ( $\mu$ )-frequency ( $f$ ) characteristic of the  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$  single layer in the 0 Hz-200 MHz range, showing  $\mu_r = \mu' = 131$  in the entire range.

Fig. 6은  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$  단일층의 0~200 MHz 영역에서의 자화율( $\mu$ )주파수( $f$ )의 특성을 나타낸다.  $\mu_r = \mu' = 131$  값을 가지며 200 MHz까지 일정하였다. 이 결과는  $f = 200$  MHz까지는 공진이 일어나지 않는다는 것을 나타내고 있다.

### 3.3 자성 다층 박막 구조의 설계

절연 층이 갖는 dielectric breakdown과 capacitively coupled된 층간의 손실에 대한 특성은 자성 다층 박막의 설계를 최적화 시킬 때 반드시 고려해야 할 사항이다. 자성 박막층의 두께( $t_m$ ), 비자성 절연층의 두께( $t_n$ ) 그리고  $H_{an}$  사이의 상호관계는 다음과 같이 표현될 수 있다[3].

$$\mu_r' = \frac{\mu_m t_m}{(t_m + t_n)} \quad (8)$$

여기서

$$t_m = \frac{\delta}{\alpha_m} \quad (9)$$

$$\delta = \sqrt{2\rho_m / (2\pi f_c \mu_m \mu_0)} \quad [3.1절의 (7)]$$

$$\mu_m = \frac{M_s}{H_{an}} \quad [3.1절의 (2)]$$

$$f_c = 2.8\sqrt{H_{an} \cdot M_s} \quad [3.1절의 (3)]$$

$\mu_m$ 은 soft 자성 박막층의 자화율,  $\delta$ 는 skin depth,  $\alpha_m$ 은 margin 요소,  $\rho_m$ 은 자성 박막층의 비저항을 나타낸다. (2), (3), (7)-(9)의 식을 이용하여 computer 시뮬레이션을 통해 얻어진 NiFe/SiO<sub>2</sub> (50/100 nm), CoZrNb/SiO<sub>2</sub> (100/100 nm), Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>/SiO<sub>2</sub> (50/100 nm) 자성

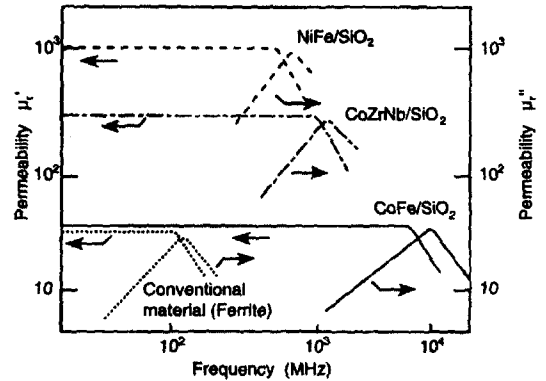


Fig. 7. Complex permeability ( $\mu$ )-frequency ( $f$ ) characteristic of various magnetic multilayers obtained from the computer simulation.

다층 박막들의 permeability 주파수 특성은 Fig. 7에 나타나 있다. 특히 Fig. 7에서  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{SiO}_2$ 로 구성된 자성 다층 박막은 이미 실용화되어 있는 ferrite의  $\mu_r \times f_c$  곱의 100배 이상의 큰 값을 가지며 ~5 GHz의 고주파수 영역에서 사용될 수 있는 좋은 후보가 된다는 것을 알 수 있다.

### 3.4 자성 다층 박막의 자성 특성

Fig. 8은  $10 \times [100 \text{ nm } \text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/100 \text{ nm } \text{SiO}_2]$  다층 박막의 대표적인  $B-H$  loop 특성을 나타낸다. Fig. 8로부터 다층 박막의 측정된 유효 magnetization  $M_s' = 9480$  Gauss이고,  $H_c = 24$  Oe,  $H_{an} = 124$  Oe임을 알 수 있다. 측정된  $M_s'$ 는 계산된  $M_s' [= M_s \times (\frac{t_m}{t_m + t_n})]$  (여

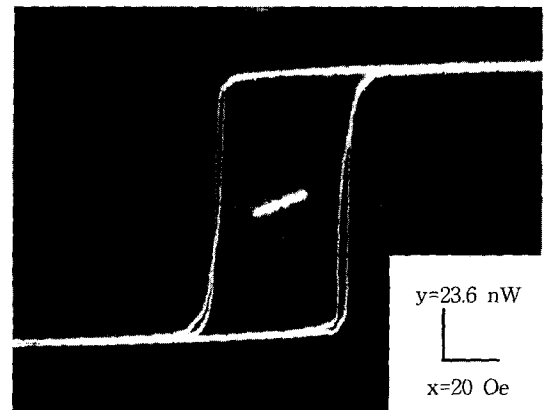


Fig. 8. Typical  $B-H$  loops of nominal  $10 \times [100 \text{ nm } \text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/100 \text{ nm } \text{SiO}_2]$  multilayer films, indicating that the effect magnetization  $M_s' = 9480$  Gauss,  $H_c = 24$  Oe, and  $H_{an} = 124$  Oe. Here,  $x = 20$  Oe/div,  $y = 23.6$  nW/div.

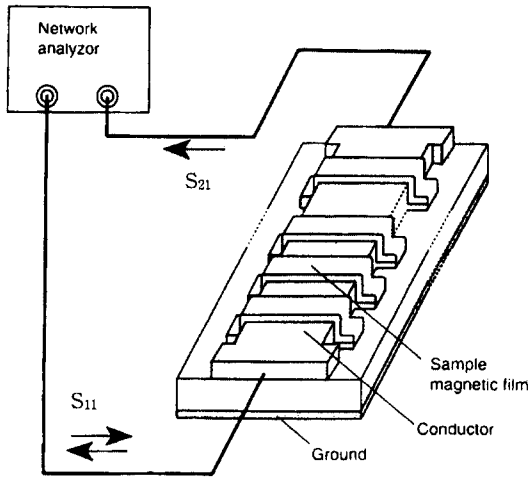


Fig. 9. Schematic of permeability measurement system.

기서  $M_s$ 는 자성 박막층만의 자화이다.의 값인 9501 Gauss와 거의 일치하였으며 측정된  $H_{an}$ 의 값 124 Oe는 3.1절에서 예측되었던  $30 \leq H_{an} \leq 125$  Oe 범위 중  $f_c \approx 5$  GHz이 되기 위한  $H_{an}$ 의 최대값 125 Oe와 일치함을 알 수 있다.

MHz~GHz 주파수 영역에서 자성 박막 다층의 permeability-주파수 특성을 측정하는데 사용된 시스템은 Fig. 9에 나타나 있다. 여기서 sample magnetic film은 Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>/SiO<sub>2</sub>로 이루어진 자성 다층 박막을 의미하고 conductor로서는 Cu가 사용되었다. 이러한 sample magnetic film과 Cu로 이루어진 층상구조는 일종의 microstrip line이다.

자성 다층 박막 sample의 complex relative permeability [ $\mu_r(f)$ :  $\mu_r'(f) - j\mu_r''(f)$ ]의 주파수 특성은 microstrip line의 전송특성 ( $S_{11}$ ,  $S_{21}$  파라미터)로부터 다음과 같은 원리로 측정되었다.

우선  $\mu_r''$ 의 주파수 특성은 S-파라미터로 분석되는 magnetic absorption으로부터 얻어진다.  $S_{21}$  전송파라미터는

$$|S_{21}|^2 = (1 - |S_{11}|^2)(1 - |A_o|^2) \times (1 - |A_m|^2)(1 - |S_{22}|^2) \quad (10)$$

로 기술되고 여기서  $A_m$ =자성 박막층에서의 absorption,  $A_o$ =다른 absorption이다.  $|A_m|^2$ 은  $\mu_r'' \times f$ 와 비례하므로 우리는  $\frac{|A_m|^2}{f}$ 의 주파수 특성으로부터  $\mu_r''$ 의 주파수 특성을 얻는다[8]. 또한 loss(L)은

$$L = \frac{(1 - |S_{11}|^2)(1 - |S_{22}|^2)}{|S_{21}|^2} \quad (11)$$

로 표현되고 (10)식을 (11)식에 대입하면

$$L = [(1 - |A_o|^2)(1 - |A_m|^2)]^{-1} \quad (12)$$

를 얻는다. 이때 외부자기장이 인가되지 않았을 때의 loss[L(0)]와 인가되었을 때의 loss[L(H)]는 (12)식으로부터 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$L(0) = [(1 - |A_o(0)|^2)(1 - |A_m(0)|^2)]^{-1} \quad (13)$$

$$L(H) = [(1 - |A_o(H)|^2)(1 - |A_m(H)|^2)]^{-1} \approx (1 - |A_o(0)|^2)^{-1} \quad (14)$$

(14)식에서  $A_o$ 는 외부자기장의 인가 여부와 무관하므로  $|A_o(H)|^2 \approx |A_o(0)|^2$ 이 되고 또한 외부 자기장이 자성 박막층의  $M_s$ 를 포화시킬 때의  $|A_m(H)|^2 \approx 0$ 가 되도록 간소화 될 수 있었다. (13)과 (14)식으로부터

$$\mu_r'' \times f \propto |A_m(0)|^2 = 1 - \left[ \frac{L(H)}{L(0)} \right] \quad (15)$$

를 얻을 수 있다. 따라서  $\mu_r''$ 의 주파수 특성은 L(H)와 L(0)의 주파수 특성, 즉  $S_{11}$ ,  $S_{21}$ 의 주파수 특성으로부터 얻어진다 [(11)식 참조].

다음으로  $\mu_r'$ 의 주파수 특성은 Kramers-Kronig 관계식 [9]

$$\mu_r'(f) = 1 + \left(\frac{2}{\pi}\right)p \int_0^\infty \left[ \frac{x \cdot \mu_r''(x)}{(x^2 - f^2)} \right] dx \quad (16)$$

으로부터 얻어진다. 여기서  $p$ =principal 값,  $x$ =적분변수이다. 위와 같이 하여 얻어진  $\mu_r'$ 와  $\mu_r''$ 의 주파수 특성은 Fig. 10에 보여진다. Fig. 10에서 얻어진 static 자화율 [ $\mu_r'(0)$ ]<sub>measured</sub>와 공진 주파수 [ $f_c$ ]<sub>measured</sub>는 다음과

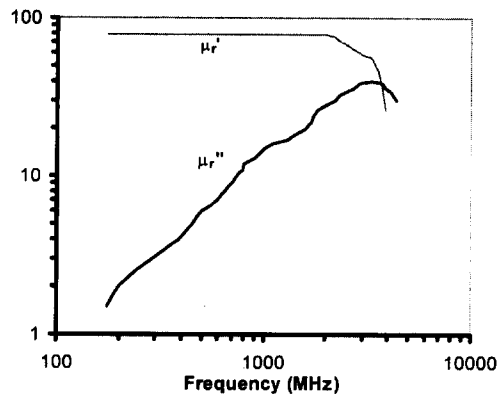


Fig. 10. Complex permeability ( $\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$ )-frequency ( $f$ ) characteristic of nominal  $10 \times [100 \text{ nm Co}_{90}\text{Fe}_{10}/100 \text{ nm SiO}_2]$  multilayer films.

**Table IV.** Static relative permeability ( $\mu_r'(0)$ ) and ferromagnetic resonance frequency ( $f_c$ ) of the  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$  thin films obtained from Fig. 10 compared with those calculated from eqs. (17) and (18)

Parameters	측정된 값	계산된 값
$\mu_r'(0)$	79	76.6
$f_c$	3.3(GHz)	3.035 (GHz)

같은 식

$$[\mu_r'(0)]_{\text{calculated}} = \frac{M_s'}{H_{an}} = \frac{M_s}{H_{an}} \left( \frac{t_m}{t_m + t_n} \right) \quad (17)$$

$$[f_c]_{\text{calculated}} = 2.8\sqrt{M_s' \cdot H_{an}} \quad (18)$$

으로부터 계산된 값들과 비교되었으며 그 결과는 Table IV에 나타나있다. Table IV에서 알 수 있듯이 측정값과 계산된 값들은 아주 잘 일치하고 있다.

#### 4. 요약 및 결론

본 논문에서는 고주파용(1-5 GHz) 자성박막 재료의 개발에 대하여 연구하였다. 우선 문헌조사와 computer simulation을 통해 30-125 Oe 사이의  $H_{an}$  값과 1800 Å 보다 작은 두께를 갖는  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ 을 고주파용 자성재료로 선택하였고, ~1000 Å 두께를 가진 양질의  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$  단일박막층은 RF magnetron sputtering 장비를 이용하여 여러 가지 기판(glass, Si, polyimide) 위에 적층되었다.

다음으로 고주파 영역에서 Eddy 전류 손실의 최소화를 위해 양질의 자성 단일층과 절연 박막층의 laminate 구조를 갖는 자성 다층 박막 구조의 설계가 computer simulation을 통해 이루어졌고,  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{SiO}_2$ 로 구성된 자성 다층 박막이 선택되었다. 이러한 결과를 바탕으로  $10 \times [100 \text{ nm } \text{Co}_{90}\text{Fe}_{10} / 100 \text{ nm } \text{SiO}_2]$  다층 박막은 이미 확보된 양질의 자성 단일층의 적층 기법을 이용하여 적층되었다. 적층된 다층 박막의  $B-H$  loop

특성에서 얻어진 magnetization과  $H_{an}$ 값은 예측된 값과 일치하였다. 자성 다층 박막의 자화율( $=\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$ )의 주파수 특성은 자성 다층 박막과 Cu로 이루어진 층상 구조를 갖는 microstrip line을 network analyzer에 연결하여 전송 특성( $S_{11}$ ,  $S_{21}$  파라미터)을 측정함으로써 얻어졌다. 이때  $\mu_r''$ 의 주파수 특성은 S-파라미터로 분석되는 magnetic absorption으로부터 얻어졌고,  $\mu_r'$ 의 주파수 특성은 Kramers-Kronig 관계식을 사용하여  $\mu_r''$ 의 주파수 특성으로부터 계산되었다. 얻어진  $\mu_r$ 의 주파수 특성(static 자화율, 공진주파수)은 계산에 의해서 얻어진 값들과 잘 일치된다는 것을 확인하였다.

#### 감사의글

본 연구는 정보통신연구관리단의 대학기초연구지원 사업에 의하여 이루어졌음

#### 참고 문헌

- [1] K. Kawabe, H. Koyama, and K. Shirae, IEEE Trans. Magn. **MAG-20**(5), 1804(1984).
- [2] I. Sasada, T. Yamaguchi, K. Harada, and Y. Notohara, IEEE Trans. Magn. **29**(6), 3231(1993).
- [3] M. Senda and O. Ishii, IEEE Trans. Magn. **MAG-30**(1), 155(1994).
- [4] R. M. Bozorth, Ferromagnetism, IEEE press, New York (1993).
- [5] J. P. Smit and H. P. J. Wijn, Ferrites, John Wiley and Sons, New York (1960), pp. 271.
- [6] C. H. Tolman, J. Appl. Phys. **38**, 3409(1967).
- [7] R. M. Walser, A Study of Thin Film Magnetodielectrics, Ph. D. Dissertation, University of Michigan (1968), pp. 31-32.
- [8] A. Abragam, Principles of Nuclear Magnetism, Oxford University Press, London (1961), pp. 40-44.
- [9] J. M. Ziman, Principles of the Theory of Solids, Cambridge University Press, London (1964), pp. 219-223, 241-246.

## High Frequency Magnetic Characteristics of Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub> Thin Films and Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>/SiO<sub>2</sub> Multilayers

Eui-Jung Yun, Hyun-Joon Jin\*, Nho-Kyung Park\*, Dae-Chul Moon\* and Jwa-Yeon Kim\*\*

*Department of Electrical, Electronic, and Control Engineering*

*\*Department of Information and Telecommunication Engineering*

*\*\*Department of Materials and Chemical Engineering*

*Hoseo University, Chungnam 336-795, Korea*

(Received 29 June 1998, in final form 14 October 1998)

The Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub> single layer films were deposited on various substrates (glass, Si, polyimide) using high vacuum RF magnetron sputtering system and nominal 1000 Å thick Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub> alloy films had a good high frequency characteristic.  $M_s$  and  $H_m$  values obtained from the B-H characteristic of the  $10 \times [100 \text{ nm Co}_{90}\text{Fe}_{10}/100 \text{ nm SiO}_2]$  multilayers agreed well with those obtained by calculation. Complex relative permeability ( $= \mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$ ) at frequency  $f$  was measured from the transmission characteristics ( $S_{11}$ ,  $S_{21}$  parameters) of the microstrip line which has a stacked structure consisting of sample magnetic films and a conductor and is connected to a network analyzer. The  $\mu_r''$ - $f$  characteristic was obtained from the magnetic absorption, which was analyzed from the  $S$ -parameter characteristics of the microstrip line. The  $\mu_r'$ - $f$  characteristic was also calculated from the  $\mu_r''$ - $f$  characteristic using the Kramers-Kronig relation. The measurement results were confirmed to agree well with those obtained by calculation.