

자성막의 고주파 투자율 측정

최형 · 장경도 · 권상일

삼성전자 기술총괄

수원시 팔달구 매탄3동 416번지, 441-742

(1994년 9월 29일 받음, 1994년 12월 30일 최종수정본 받음)

고주파(100 kHz-200 MHz)에서 자성막의 초투자율을 측정하기 위해 가장 많이 사용하고 있는 8자 coil법과 이의 개량형인 s-parameter법을 소개하고 두 방법을 비교하였다. s-parameter법을 사용하여 투자율 측정기를 제작하고 투자율 측정시 발생할 수 있는 문제점 및 해결 방안을 제시 하였다. 측정용 program을 제작하여 단순한 button 조작으로 빠른 시간 내에 자성막의 투자율을 측정할 수 있었으며 감자장(demagnetizing field)을 고려하여 정확한 투자율을 계산 하였다. 이 투자율 측정기를 사용하면 100 kHz-200 MHz 대역에서 최소 약 1 μm 정도의 permeance 까지 측정 가능 하였다.

I. 서 론

최근 자기기록 분야에서는 고밀도 기록 및 고주파 사용이 가능하기 때문에 자성 박막을 이용하여 자기헤드를 제조하는 경우가 점차 증가하고 있다. 고주파 기록 및 재생을 하기 위해서는 자성막의 투자율은 매우 중요하다. 자성막의 투자율을 측정하는 방법에는 여러가지가 있다. 그러나 비등방적인 자성막의 투자율을 고주파에서 측정하는데는 많은 제약이 따른다. B-H loop tracer를 이용하면 자성막의 비등방성을 알 수 있지만 고주파에서의 초투자율은 측정하기 어렵다. 특정 형태로 가공한 ferrite block을 이용하는 ferrite yoke method[1]는 고주파에서 공진이 발생하기 때문에 공진 주파수 이상에서의 투자율 측정이 불가능 하다.

현재 고주파 영역에서 자성 박막의 투자율을 측정하는 방법으로 가장 많이 사용하는 것은 8자 coil 법이다[2-5]. 그러나 이 방법은 측정 시간이 오래 걸리고 막의 두께가 10 μm 이상 되는 감자(demagnetizing) factor가 큰 시료의 경우는 정확한 투자율을 측정하기 어려운 단점이 있다. 村岡 등은 감자장에 대한 보정법을 개발 하였으나[6] 이 방법 역시 측정 시간이 오래 걸린다는 단점을 해결하지 못하였으며 보정계수가 근사적인 값이기 때문에 정확한 투자율을 측정한다고 보기는 어렵다. Grimes 등은 8자 coil법을 개선하여 자성막의 투자율을 신속하게 측정하는 법을 고안해 내었다[7, 8]. 이 방법은 network analyzer를 이용하여 s-parameter를 측정하므로써 투자율을 구하는 방법이므로 앞으로는 이 방법을 s-parameter법이라 부르겠다. 본 논문에서는 8자 coil법과 s-parameter법의 측정 원리를 소개하고 s-parameter법

을 이용한 투자율 측정장치 제작에 대하여 언급하였다. 아울러 투자율 측정시 발생할 수 있는 문제점 및 해결 방안을 제시 하였다.

II. 측정 원리

(1) 8자 coil법

박막의 고주파 투자율을 측정하기 위한 8자 coil 장치는 교류 자기장을 가하기 위한 network analyzer, RF amplifier 및 drive sheet, 신호를 감지하기 위한 8자 coil과 reference sense coil(H coil), RF amplifier로 구성된다(Fig. 1. 참조).

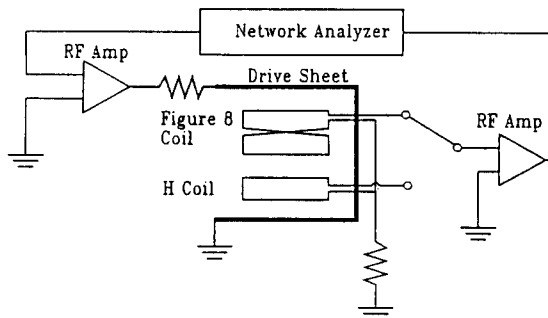


Fig. 1. Block diagram of figure 8 coil method

H coil과 8자 coil의 아래 부분(lower coil)은 서로 인접하게 배치되어 있다. 박막은 8자 coil 윗부분(upper coil)에 삽입하고, 8자 coil 아래부분과 H coil은 자기장을 검출하는데 사용한다. Fig. 2. 에 시편 및 coil의 위치

를 나타냈다.

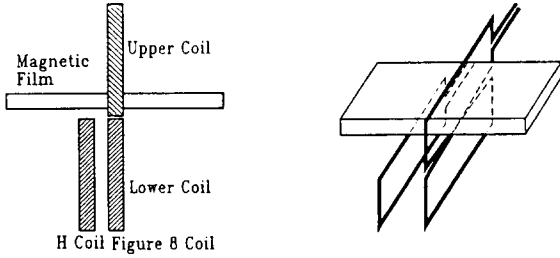


Fig. 2. Configuration of magnetic film and coils

drive sheet에 의해 가해지는 자기장을 $H(\text{Oe})$, 박막 삽입시 시료에 가해지는 자기장을 $h(\text{Oe})$ 라 하였다. 시료 삽입시 시료 및 coil이 받는 자기장이 달라지는 것은 시료의 반자장의 영향 때문이다. H coil의 단면적을 $A_H(\text{cm}^2)$, 8자 coil중 upper coil의 단면적을 $A_1(\text{cm}^2)$, lower coil의 단면적을 $A_2(\text{cm}^2)$, 자성막의 단면적을 $A_f(\text{cm}^2)$ 라 하면, 시료를 삽입하지 않았을때 H coil에 유도되는 기전력(V)은 다음과 같다.

$$V_{H0} = -10^{-8} A_H \frac{dH}{dt} \quad (1)$$

이때 8자 coil에 유도되는 기전력은

$$V_{80} = -10^{-8} (A_1 - A_2) \frac{dH}{dt} \quad (2)$$

이다. 박막을 삽입할 경우 H coil에 유도되는 기전력은

$$V_H = -10^{-8} A_H \frac{dh}{dt} \quad (3)$$

이고, 이 경우 8자 coil에는

$$V_8 = -10^{-8} \{ (A_1 - A_f - A_2) \frac{dH}{dt} - 10^{-8} \mu A_f \frac{dh}{dt} \} \quad (4)$$

의 기전력이 유도된다.

(1) ~ (4) 식으로부터

$$\mu = \left(\frac{V_8}{V_H} - \frac{V_{80}}{V_{H0}} \right) \frac{A_H}{A_f} \quad (5)$$

로 된다. 보통 자성막의 투자율은 $10^2 \sim 10^3$ order이므로

$\mu \cong \mu - 1$ 을 이용 하여 (5)식을 계산 하였다.

(1) ~ (4)의 기전력은 굉장히 작아 측정이 어려우므로 coil과 network analyzer 사이에 RF Amplifier를 연결 하였다. 이때 pickup coil의 impedance가 주파수에 대해 변화하므로 amplifier의 전송계수를 변화 시켜야 한다[5].

위의 경우에는 박막 삽입시 박막 자체에 가해지는 자기장과 주위의 coil에 가해지는 자기장이 동일한 값 h 를 갖는다고 가정하였으나 실질적으로는 시료의 감자장으로 인해 차이가 있으므로 다음과 같이 보정하였다[6].

$$V_H = -10^{-8} A_H \frac{d(H - kH_d)}{dt} \quad (6)$$

$$V_8 = -10^{-8} \mu A_f \frac{d(H - H_d)}{dt} - 10^{-8} \{ (A_1 - A_f) - A_2 \} \frac{d(H - kH_d)}{dt} \quad (7)$$

여기에서 k 는 보정계수, H_d 는 시료에 의한 감자장이다. 이 결과 투자율 μ 는 다음 식으로 나타 내어진다.

$$\mu = \frac{\frac{A_H}{A_f} \left(\frac{V_8}{V_H} - \frac{V_{80}}{V_{H0}} \right)}{\frac{V_{H0}}{V_H} + \left(1 - \frac{V_{H0}}{V_H} \right) \frac{1}{k}} \quad (8)$$

(2) s-parameter법

고주파에서는 적당한 신호를 인가하고 입력및 출력 신호를 측정하므로써 device를 평가할 수 있다. 측정할 device가 2 port를 가지고 있고 port 1으로 입력되는 파를 a_1 , port 1에서 출력되는 파를 b_1 , port 2로 입력되는 파를 a_2 , port 2에서 출력되는 파를 b_2 라 하면 다음의 관계식이 성립한다. (Fig. 3 참조)

SCATTERING PARAMETER DEFINITION

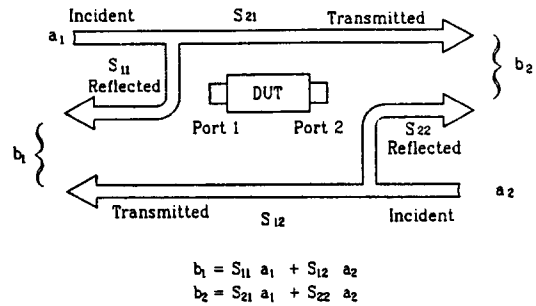


Fig. 3. Scattering parameter definition

$$b_1 = S_{11} a_1 + S_{12} a_2$$

$$b_2 = S_{21} a_1 + S_{22} a_2$$

port 2에서의 입력파가 없을 경우($a_2 = 0$) s-parameter는 다음과 같다.

$$S_{11} = \text{Reflected / Incident} = b_1 / a_1$$

$$S_{21} = \text{Transmitted / Incident} = b_2 / a_1$$

이중 S_{21} 을 측정 하므로써 자성막의 투자율을 구할 수 있다.

s-parameter법을 이용한 투자율 측정장치는 투자율 측정 jig, network analyzer, 그리고 박막을 포화시키기 위한 Helmholtz coil 또는 영구자석으로 구성된다. 기존의 8자 coil법이 한쌍의 drive sheet를 사용하는데 비해 s-parameter법에서는 두쌍의 drive sheet를 사용하며 별도의 reference sense coil(H coil)을 사용하지 않는다(Fig. 4. 참조). 두 pickup coil은 상하 대칭적으로 제작하였다.

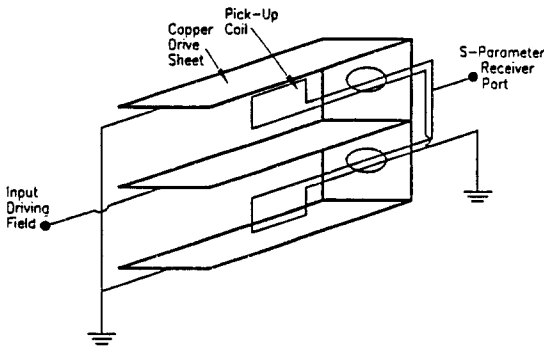


Fig. 4. Schematic diagram of permeameter

network analyzer에서 공급되는 voltage를 $V_{in}(V)$, 투자율 측정 jig의 input impedance를 $Z_{in}(\Omega)$, network analyzer에서 공급되는 전류를 $i(A)$ 라 하면, 투자율 측정 jig에는 두쌍의 drive sheet가 병렬로 연결되어 있으므로 한쪽 sheet에 흐르는 전류는 $i/2$ 가 된다. 여기에 Ampere의 법칙을 적용하면 drive sheet 내에 발생하는 자기장은

$$\begin{aligned} H(Oe) &= H_0 \exp(j\omega t) = \frac{\pi i}{5W} \\ &= \frac{\pi V_{in}}{5WZ_{in}} = \beta V_{in} \end{aligned} \quad (9)$$

이 된다. 여기서 W 는 drive sheet의 폭(cm)이고 β 는 상수이다.

윗쪽 pickup coil 내로 단면적이 $A_f(\text{cm}^2)$ 인 sample이 삽입 되었을 경우 Faraday의 법칙에 의하여 다음과 같은 기전력이 유도 된다.

$$V_{out} = V_{up} - V_{down} = -j\omega 10^{-8}(\mu - 1) H A_f \quad (10)$$

(9), (10)식에서

$$V_{out} / V_{in} = -j\omega 10^{-8}(\mu - 1) A_f \beta \quad (11)$$

투자율 측정 jig의 회로 공진에 의한 신호를 Γ 라 하면 S_{21} 은 다음과 같다.

$$S_{21} = V_{out} / V_{in} = -j\omega 10^{-8}(\mu - 1) A_f \beta + \Gamma \quad (12)$$

자성막을 외부 자기장에 의해 포화 시켰을 경우, 자기 moment는 drive sheet에 의해 발생하는 자기장에 대해 반응하지 않아 $S_{21} / \text{sat} = \Gamma$ 가 된다. 따라서,

$$\Delta S = S_{21} - S_{21} / \text{sat} = -j\omega 10^{-8}(\mu - 1) A_f \beta \quad (13)$$

이다. 여기서 상수 β 는 (9)식으로 부터 대략적인 값을 계산할 수 있으나 정확한 값을 구하기는 힘이 든다. 따라서 정확한 투자율 값을 얻기 위해서는 실험적인 방법으로 상수 β 를 제거하는 것이 바람직하다. 우리는 이를 위해 이미 투자율을 알고 있는 표준 sample(reference sample)을 사용하였다. 표준 sample을 측정한 ΔS 값을 ΔS_r , 투자율을 μ_r , 막의 단면적을 A_r 이라 하면,

$$\frac{\Delta S}{\Delta S_r} = \frac{(\mu - 1) A_f}{(\mu_r - 1) A_r} \approx \frac{\mu A_f}{\mu_r A_r} \quad (14)$$

마지막 식은 $\mu, \mu_r \gg 1$ 인 관계를 이용 하였다. (14)식에서

$$\mu = \frac{\mu_r A_r \Delta S}{A_f \Delta S_r} \quad (15)$$

여기서 $\mu, \mu_r, \Delta S, \Delta S_r$ 이 복소수 이므로 (15)식의 분모를 실수화하여 μ 를 실수부와 허수부로 나누어야 한다. 이를 위해서는 직각 좌표계 보다는 극 좌표계를 쓰는것이 편리하다. 극좌표계를 사용하여

$$\begin{aligned} \Delta S &= |\Delta S| \exp(j\phi), \Delta S_r = |\Delta S_r| \exp(j\phi_r) \\ \mu &= |\mu| \exp(-j\theta), \mu_r = |\mu_r| \exp(-j\theta_r) \text{ 이라 하면,} \\ \mu &= \mu' - j\mu'' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{A_r |\Delta S| |\mu_r|}{A_r |\Delta S_r|} \exp\{j(\phi - \phi_r - \theta_r)\} \\
 &= \frac{A_r |\Delta S| |\mu_r|}{A_r |\Delta S_r|} \{ \cos(\phi - \phi_r - \theta_r) \\
 &\quad - j \sin(\phi - \phi_r - \theta_r) \} \quad (16)
 \end{aligned}$$

이 된다.

감자를 무시할 수 있는 경우에는 (16)식을 그냥 사용하여도 무방하나, 박막의 두께가 두꺼운 경우 감자가 커지며 이에 따라 측정된 투자율에도 영향을 미쳐 이의 보정이 필요하다. 우선 인가한 자기장과 시료가 받는 실질 자기장과의 관계식을 알아보면

$$H = H_a - H_d = \frac{4\pi}{4\pi + N_d(\mu - 1)} H_a \quad (17)$$

이다. 감자의 효과를 보정하지 않고 측정된 (16)식의 투자율을 μ_m 이라 하면,

$$\mu_m = \frac{B}{H_a} = \frac{\mu H}{H_a} \quad (18)$$

이 식에 (17)식을 대입하면,

$$\mu = \frac{(1 - \frac{N_d}{4\pi}) \mu_m}{1 - \frac{N_d}{4\pi} \mu_m} \quad (19)$$

이 된다. 사용하는 시료가 직경 d , 두께 t 인 disc일 경우는 이를 oblate로 보아 다음과 같은 감자 factor를 얻는다[9].

$$N_d \approx \frac{t\pi^2}{d} \quad (20)$$

(19)식을 실수부와 허수부로 나누면 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned}
 \mu' &= \frac{(1 - \frac{N_d}{4\pi}) \mu_m' - \frac{N_d}{4\pi} (1 - \frac{N_d}{4\pi}) (\mu_m'^2 + \mu_m''^2)}{(1 - \frac{N_d}{4\pi} \mu_m')^2 + (\frac{N_d}{4\pi} \mu_m'')^2} \\
 \mu'' &= \frac{(1 - \frac{N_d}{4\pi}) \mu_m''}{(1 - \frac{N_d}{4\pi} \mu_m')^2 + (\frac{N_d}{4\pi} \mu_m'')^2} \quad (21)
 \end{aligned}$$

여기서 $N_d = 0$ 인 경우, $\mu = \mu_m$ 이 됨을 확인할 수 있다.

III. 결과 및 고찰

제작한 투자율 측정 jig의 drive sheet는 폭 5 cm, 길이 12.5 cm, 두께는 1.57 mm였으며 기존의 기판을 사용하여, 동박 형성을 위한 증착에 따른 비용을 감소하였다. 이 기판의 동박의 두께는 4.7 μm 였다. Pickup coil 역시 같은 기판을 etching 하여 pattern을 형성하여 제작하였으며, 상하 두 coil이 대칭이 되도록 하였다(Fig. 5. 참조). jig 제작에 소요된 기판은 총 8장 이었다. pickup coil 연결시 납땜을 사용할 경우 납땜 부위가 너무 높게 형성되어 조립이 어려워 진다. 따라서 두 기판 사이 pickup coil 연결에는 3M사의 도전 tape (brand # 1181)을 사용 하였다. 이 도전 tape은 가공이 쉽고, 쉽게 구부릴 수 있으며 전기 저항이 거의 없었다. 여러 도전 tape중 # 1181을 사용한 이유는 ohmic contact이 가장 적었기 때문이다. 이렇게 제작된 pickup coil의 단면적은 28 mm \times 3.14 mm 였으며, 시료 삽입용 slot의 크기는 25 mm \times 1.4 mm 였다.

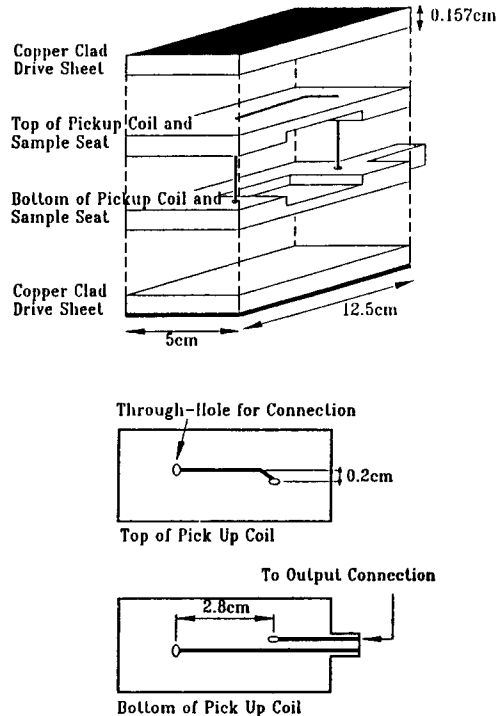


Fig. 5. Sheet layers for one of two pickup coil assemblies

stray signal로 인해 투자율 측정에 영향을 줄 수 있으므로 brass block을 사용하여 도선 연결 부위를 둘러싸 (Faraday Cage), 이 효과를 없앴으며 아울러 jig는 더욱 튼튼하게 조립할 수 있었다. s-parameter set의 input port에서 나오는 source power는 최대 15 dBm (port power 2 dBm) 이고 1 ~ 100 MHz 범위에서 투자율 측정 jig의 input impedance는 0.3 ~ 25 Ω 이었다. (9)식을 이용하여 계산하면 이때 발생한 자기장은 1 MHz에서 160 mA/m(약 2.0 mOe), 100 MHz에서 82.4 mA/m(약 1.3 mOe)이고 source power를 9 dBm으로 낮추었을 경우에는 1 MHz에서 80 mA/m(약 0.99 mOe), 100 MHz에서는 56 mA/m(약 0.7 mOe)의 자기장을 얻었다. 주파수에 따라 측정 jig의 impedance가 변화 하였으므로 모든 주파수에 대해 일정한 인가 자기장을 얻을 수는 없었다. Rayleigh에 의하면 초 투자율 영역의 작은 자기장 하에서는 투자율이 인가 자기장에 무관하게 일정하므로[10] 주파수에 따른 jig의 impedance 변화는 큰 문제가 되지 않는다.

표준 sample의 투자율이 주파수에 따라 변화할 경우 박막의 투자율을 계산하기 위해서는 각 주파수에서의 표준 sample의 투자율을 대입하여야 한다. 이 경우, 표준 sample의 실수부 및 허수부를 각각 대입하여야 하므로 계산이 복잡해지며, 측정을 간편하게 하기 위한 programming 작업도 어려워진다. 그리고 입력된 주파수에서의 투자율만을 알 수 있고 continuous한 주파수에 대한 투자율 값을 알 수 없다. 따라서 투자율이 주파수에 대해 일정한 값을 갖는 박막을 표준 sample로 하는 것이 바람직하다. 우리가 사용한 표준 sample은 Permalloy 박막으로 두께는 약 0.2 μm 이고, Ar압 2mT, power 250W, d. c. bias 100 V의 조건에서 제조 하였다. 이 sample은 와전류 손실이 거의 없어 100 MHz 정도까지 투자율이 거의 일정 하였다($|\mu_r| = \mu_r' \approx 2050, \mu_r'' \approx 0$). 이 경우는 (15)식에서 ΔS 및 μ_r 이 모두 상수 이므로 계산 및 programming이 용이하다.

본 투자율 측정 방법은 박막을 포화시킨 상태에서 s-parameter를 측정하여야 하므로 이를 위해 Helmholtz coil을 제작 하였다. 제작된 Helmholtz coil은 반경 10 cm, 권선수는 250회였으며, 자장 인가 시간이 짧으므로 별도의 냉각 장치는 설치 하지 않았다. 좋은 특성을 나타내는 연자성 막의 경우는 Helmholtz coil로 충분히 포화되나, 고주파에서는 자성막의 보자력이 증가 하므로 더욱 강력한 인가 자기장이 필요할 경우가 생긴다. 우리의 실험에서는 일정한 주파수에서 Helmholtz coil의 전류를 증가 시키면서 측정 한 S_{21}/S_{21sat} 의 값이 변화하였고 가능한

최고 전류를 인가 하였을 경우(약 40 Oe)에도 이 추세는 계속 되었다. Helmholtz coil의 자기장이 충분하지 않아 각 주파수에 대한 포화 자기장의 값은 측정할 수 없었다. 이러한 경우에는 강력한 영구자석을 사용하여 자성막을 포화 시켰다.

측정 장치내 sample의 위치 및 방향에 따라 S_{21} 측정치가 변화할 수 있으므로 고정 jig를 만들어 sample이 항상 drive sheet의 가운데 부분에 위치하도록 하였다. 이 방향에 따른 투자율을 측정하기 위해서는 sample의 방향을 회전 시키므로써 그 방향의 투자율을 간단히 측정할 수 있었다. 그리고 drive field의 방향이 동서가 되도록 jig를 위치시켜 지자기의 영향을 배제 하였다.

작업의 편의를 위해 투자율 측정용 program을 제작 하였으며 이때 (15), (20), (21)식을 이용하였다. 그리고 random error를 방지하기 위해 program 내에 averaging과 smoothing을 삽입 하였다. 이 program을 사용하면 단순한 button 조작으로 간단히 투자율이 측정되며, 측정에 소요되는 시간은 1분 정도이다.

이렇게 제작한 투자율 측정기는 100 kHz-200 MHz의 범위에서 투자율 측정이 가능 하였고 최소 측정 가능한 permeance(투자율 × 막두께)는 1 μm 정도였다. 1 MHz 이하의 범위에서는 pickup coil 간의 상호 inductance로 인해 noise가 심하기 때문에 통상적으로 1 MHz 이상의 범위에서 측정 하였다. 그리고 200 MHz 이상에서는 투자율 측정 jig의 resonance로 인하여 측정이 불가능 하였다.

8자 coil법 및 s-parameter법을 사용하여 이방성이

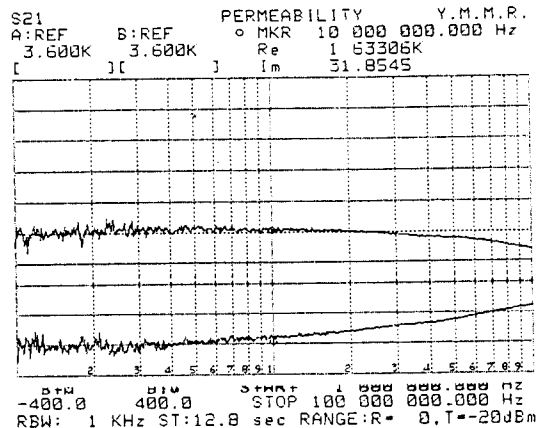


Fig. 6. Permeability of a permalloy film by s-parameter method

좋은 permalloy의 hard axis와 easy axis의 투자율을 측정 하였다. 8자 coil법 측정에는 일본 Ryowa사의 MMS 5000을 이용하였으며, 사용된 permalloy는 두께 1 μm , 직경 19 mm인 disk 형태였다. Fig. 6에 s-parameter법으로 측정한 hard axis의 투자율을 나타내었다. 그림에서 세로축은 투자율의 크기를 나타내고, 한 눈금은 400 이다. 가로축은 log scale로 표시한 주파수(1-100 MHz)이며, 두 curve는 각각 μ_r' 및 μ_r'' 이다.

Table I에 투자율의 실수부를 비교 하였다. 이 sample은 이방성이 상당히 좋아 easy axis와 hard axis 간의 투자율 차이가 상당히 컸다. 고주파에서 8자 coil법으로 측정한 hard axis 투자율이 작게 나오는 것은 amplifier의 전달계수 차이 때문인 것으로 추측되며, easy axis의 경우 투자율이 작아 큰 차이가 없었다.

Table I. Permeability of a permalloy film (A : Figure 8 coil, B : s-parameter)

Freq. (MHz)	μ' (Hard Axis)		μ' (Easy Axis)	
	A	B	A	B
1	1266	1414	24	18
5	1402	1664	56	15
10	1390	1633	54	17
15	1407	1621	62	21
20	1185	1616	117	21
25	1450	1594	69	20
30	1453	1572	55	21
35	1403	1544	62	18
40	1333	1529	62	18
45	1248	1522	63	17
50	1248	1517	56	18
60	1064	1483	51	17
70	1042	1452	57	16
80	988	1422	45	15
90	796	1391	32	14
100	611	1365	23	14

두께 2.6-2.7 μm softmax(FeRuGaSi)를 각각 2층 및 3층 적층한 두개의 sample을 측정하였다. 자성막은 3.6 mT, 0.8 kW의 조건에서 rf magnetron sputter 하여 제작하였고 target의 크기는 4"였다. 두 sample 모두 중간층으로 SiO₂를 0.1 μm 형성 하였고, sputter 후 450 $^{\circ}\text{C}$ 에서 1시간 동안 열처리를 행하였다. Fig. 7에 s-par

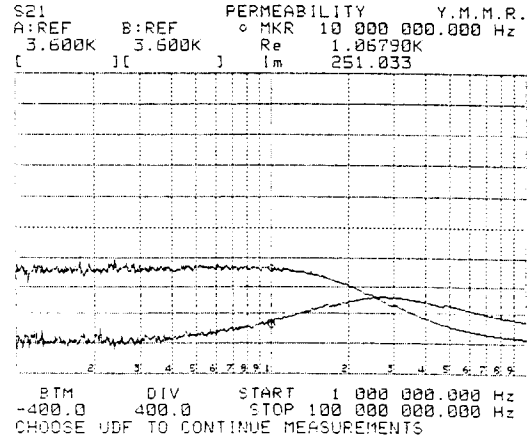


Fig. 7. Permeability of 5.4 μm softmax film by s-parameter method

Table II. Permeability of 5.4 μm softmax film(A : Figure 8 coil, B : s-parameter)

Freq. (MHz)	μ' (Hard Axis)		μ' (Easy Axis)	
	A	B	A	B
1	1159	894	514	477
5	1110	1081	540	563
10	981	1068	501	578
15	776	960	449	543
20	607	794	372	466
25	478	649	327	381
30	372	512	267	304
35	275	406	213	244
40	218	321	168	192
45	132	263	118	157
50	90	220	90	129
60	26	155	49	87
70	16	116	16	60
80	42	93	5	44
90	72	74	18	31
100	77	58	30	21

ameter법으로 측정한 hard axis 투자율의 실수부 및 허수부를 나타내었고, Table II에는 2.7 μm 를 2층 적층한 자성막의 결과를 비교 하였다. Table III에는 2.6 μm 를 3층 적층한 sample의 측정 결과를 비교 하였다.

Table III. Permeability of 7.8 μm softmax film (A : Figure 8 coil, B : s-parameter)

Freq. (MHz)	μ' (Hard Axis)		μ' (Easy Axis)	
	A	B	A	B
1	890	992	583	593
5	835	1005	592	612
10	680	869	491	579
15	455	654	381	459
20	301	503	253	343
25	251	387	204	252
30	193	306	150	188
35	145	245	109	143
40	108	197	80	108
45	56	164	39	83
50	44	138	23	65
60	0	103	9	40
70	30	81	21	26
80	34	66	31	16
90	54	54	50	9
100	59	45	50	3

Table II 와 Table III 의 결과로 부터 3층을 적층한 경우가 주파수에 따른 투자율의 감소가 더욱 심함을 알 수 있다. 이는 와전류 손실을 감소시키기 위하여 절연막으로 사용한 SiO₂의 막질이 그다지 좋지 않아 pin hole이 발생했기 때문인 것으로 추정된다.

s-parameter 법과 8자 coil 법을 비교하면, 8자 coil 법에는 RF amplifier를 2개 사용하여야 하나 s-parameter 법은 별도의 RF amplifier를 사용하지 않아 제작이 간편하며 amplifier의 전달계수를 보정할 필요가 없다. 또, 8자 coil 법에서는 k factor를 보정하여야 하며 그렇지 않을 경우 자성막의 두께가 두꺼울 수록 측정치의 신뢰도가 떨어진다.

s-parameter 법에서는 매 측정시 투자율을 알고 있는 표준 sample을 사용하여야 하며, 8자 coil 법 역시 처음 측정시 투자율 또는 포화 자속밀도를 알고 있는 시료로 보정을 하여야 한다[5]. s-parameter 법은 표준 sample의 신뢰도에 따라 측정 sample 투자율의 정확도가 결정되므로 투자율을 정확히 알고 있는 자성막을 표준 sample로 하면 측정 sample의 투자율을 정확히 알 수 있다. 또 jig 제작이 용이하기 때문에 network analyzer를 구비하고 있을 경우 별도의 고가 장비 없이 적은 비용

으로 투자율 측정기를 제작할 수 있다.

IV. 결 론

자기 헤드 재질의 가장 중요한 특성은 고주파에서의 초기 투자율 값이다. 자성막의 투자율을 고주파에서 측정하기 위해 s-parameter 법을 이용하여 투자율 측정 장치를 만들었다. 이 방법은 기존의 8자 coil 법 보다 빠른 시간내에 자성막의 투자율을 측정할 수 있고 연속적인 주파수에서의 투자율 값을 알 수 있다. 또 회로가 8자 coil 법에 비하여 간단하며 전달계수 및 k factor를 보정할 필요가 없어 편리하다. 측정 가능 주파수는 100 kHz-200 MHz로 ferrite yoke 법과 병행하면 저주파부터 고주파까지 전대역의 투자율을 측정할 수 있다. 이 방법은 network analyzer를 구비하고 있을 경우 간단한 jig의 사용으로 고주파에서의 투자율 값을 정확하게 알 수 있으므로 8자 coil 법보다 우수한 방법이라 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] N. Kumasaka, N. Saito, Y. Shiroishi, K. Shiiki, H. Fujiwara, and M. Kudo, J. Appl. Phys., **55** (6), 2238(1984).
- [2] P. A. Calcagno and D. A. Thompson, Rev. Sci. Instrum., **46**, 904(1975).
- [3] K. Kawakami, S. Narishige, M. Takagi, IEEE Trans. Magn., **MAG-19**, 2154(1983).
- [4] T. Shimizu and K. Saito, 第9回 日本應用磁氣學會 學術講演概要集, **29pA-5**, 286(1985).
- [5] 細野彰彦, 島田 寛, 沼澤潤二, 米田與志朗, 東北大學 科學計測研究所 報告, **39**(1), 27(1990).
- [6] 村岡俊作, 井原慶太, 神間 博, 島田 寛, 電子情報通信 學會技術研究報告, **MR92-12**, 19(1992).
- [7] C. A. Grimes, P. L. Trouillouid, and R. M. Walser, IEEE Trans. Magn., **24**(1), 603(1989).
- [8] C. A. Grimes, A new swept frequency permeameter for measuring magnetic thin films, M. S. thesis, Univ. of Texas at Austin(1986).
- [9] S. Chikazumi, Physics of Magnetism, John Wiley & Sons, New York, (1964), pp. 21-22.
- [10] B. D. Cullity, Introduction to Magnetic Materials, Addison-Wesley Publishing Company(1972), pp. 341-343.

High Frequency Permeability Measurement of Magnetic Films

Hyung Choi, Kyungdo Jang, Sangil Kwon

Corporate Technical Operations, Samsung Electronics Co.,

416 Maetan-3 Dong, Paldal-Gu, Suwon, 441-742, Korea

(Received 29 September 1994, in final form 30 December 1994)

We introduced and compared the two methods, 'figure-8 coil method' and 's-parameter method', to measure high frequency permeability of magnetic films. We made a permeameter by using s-parameter method and discussed about problems and solutions in measuring permeability. We can measure the permeability rapidly and exactly up to 200 MHz with the aid of computer program and the low level permeance detection limit is about $1 \mu\text{m}$.