

### 3층 자기저항소자의 제작 및 재생신호특성

김용성 · 노재철 · 박현순 · 서수정  
성균관대학교 공과대학 금속공학과  
수원시 장안구 천천동 300, 440-746

김기출 · 송용진  
이주대학교 물리학과  
수원시 팔달구 천천동 산 5, 442-749

(1998년 4월 18일 받음, 1998년 8월 19일 최종수정본 받음)

고밀도 자성박막헤드 및 센서용 3층 자기저항소자의 제작 및 재생신호특성에 대해 연구하였다. 컴퓨터계산모형에 의해 설계된 3층 자기저항소자의 자기저항곡선은 외부자장  $-15 \sim +22$  Oe 이상에서 포화되었으며, 이 곡선은 약 4 Oe 정도 선형화영역으로 이동되었다. 실제 제작된 소자에서 자기저항곡선은 외부자장  $\pm 15$  Oe 이상에서 포화되었으며, 선형화 영역으로 4 Oe 만큼 이동되었다. 실제소자와 계산모형에서의 MR 반응곡선은 서로 잘 일치함을 보였다. 또한 실제소자에서 재생출력신호의 실험결과는 외부자장  $\pm 4$  Oe 범위 내에서 정현파를 유지하였다. 이 자장 범위 내에서 3층 자기저항소자로 제작된 헤드는 양호한 재생출력특성을 나타낼 것으로 판단된다. 이는 박막물성을 제어하는 진공증착기술과 소자제작의 효율적인 제조공정으로 사용하는데 유익할 것이다.

#### I. 서 론

자기기록정보의 고밀도화와 이에 따른 우수한 재생 능력에 대한 요구는 고감도이면서 정확한 형태의 소형 자기센서 개발을 필요로 하게 되었다. 기존의 대부분 자기 기억장치는 Faraday법칙을 이용하여 기록과 재생을 하는 자기유도헤드를 사용해 왔다[1, 2]. 그러나 자기매체의 기록 밀도가 증가하고 매체의 운동 속도가 감소함에 따라 자기장의 시간 변화율을 감지하는 자기유도 헤드로는 기록된 신호를 재생하기가 어렵게 되었다. 따라서 기록 밀도가 증가함에 따라 출력과 해상도가 높고, 주파수 특성이 우수한 박막형 자기저항 헤드의 적용이 필연적이다.

본 연구에서는 고밀도 기록정보를 재생하는데 적용 가능성이 높은 여러 가지 박막형의 자기저항 (magnetoresistive : MR)헤드 소자 중 구조가 단순하고 제작이 용이하며, 고밀도 기록매체에 대응하여 높은 분해능을 나타낼 것으로 예상되는 3층 구조의 자기저항 소자를 검토하였다[3, 4]. 이 소자는 연자성층과 자기저항층 사이에 자기분리층으로 도체를 삽입하는 구조이므로 연자성박막 바이어스법 및 분로 바이어스법의 효과도 동시에 기대할 수 있다는 장점을 지닌다. 이는 conductor bias 법과는 달리 어느 정도 이상의 감지

전류는 연자성층을 포화시킴으로서 더 이상의 바이어스 영향을 미치지 못하게 되며, 최적의 자기적인 상호작용조건은 연자성 재료의 자기적특성과 소자의 기하학적 구조에 의해 결정된다. 이때 이 소자는 매체의 누설자장을 감지하는 자기저항층(magnetoresistive layer : MRL)은 NiFe 합금박막, 자장을 차폐하는 자기분리층(magnetic separation layer : MSL)은 Ti 박막, 자기저항층 내의 자장을 바이어스시키는 인접연화층(soft adjacent layer : SAL)은 CoZrMo 합금박막으로 구성된다. 이와 같은 박막에서는 그 두께 및 성장과정에 따라 전기적, 자기적특성이 현저히 변화하기 때문에 최적의 전자기적 특성을 갖는 재료에 대한 연구가 필요하다. 또한 자기저항 헤드는 그 크기가 수십  $\mu\text{m}$  이하의 소형이므로 제조공정상 반도체공정과 유사한 고도의 공정기술이 필요하며, 또한 고가의 제조설비와 원료를 사용하므로 박막헤드소자의 설계와 제조가 주요 연구대상이 되고있다[5-8].

이 연구의 목적은 3층에서 각층의 재료특성 및 소자형상에 따라 소자내부에서의 자화거동 및 자기저항 효과 변화를 이론적으로 예측하는 컴퓨터 계산 모형을 수립하고, 그에 수반하는 SAL층에 의한 MR층의 최적 바이어스 조건을 이론적으로 결정하여 최대의 재생출력조건을 조사하였다. 또한 소자의 이론적 모델 및 컵

퓨터제산에 의한 최적 설계조건으로 모형소자를 직접 제작하고 헤드로 적용 시 매체로부터 소자에 반응하는 재생신호의 특성을 모의실험을 통하여 평가하였다.

## II. 실험방법

컴퓨터제산모형에 의해 이론적으로 설계된 모형소자를 실제소자의 형상으로 음각 패터닝 스텐레스 마스크를 이용하여 각 합금박막을 연속 스퍼터공정으로 3층의 박막을 증착한 뒤, 적정 열처리조건인 300 °C, 200 Oe의 자장 중 열처리를 실시하였으며. 열처리 후 실제 3층 소자 양단에 Au전극을 입혀 최종 실험소자를 제작하였다. 이때 박막의 제조조건 및 열처리조건은 앞서 발표된 연구결과들에서 설정된 조건을 토대로 실시하였고[9, 10], 소자의 전자기적 특성 및 설계조건은 Table 1의 규격되로 제작하였으며 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

또한 실제 제작된 3층 자기저항소자의 자기저항응답 및 외부자기장의 변화에 따른 재생출력 신호 특성을 검출하기 위하여 Fig. 2의 측정장치를 제작하였다.

Fig. 2는 모형소자의 외부자장에 대한 재생출력 특성 시험을 위한 장치의 개요도이다. 3층 자기저항소자에

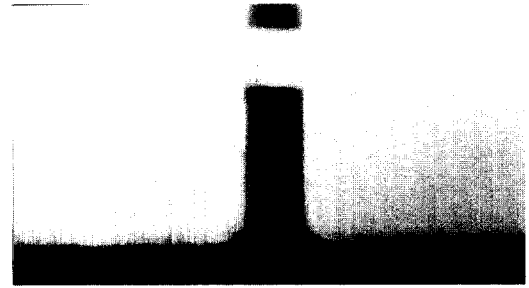


Fig. 1. Real device shape with tri-layered MR element.

서 발생한 자기저항곡선이 선형화 영역으로 어느 정도 바이어스되는지 조사하기 위해 소자내부에 D.C. 정전류를 0에서 수십 mA로 증가시켜 소자내의 수직바이어스 자장을 인가하였다. 자기저항소자가 외부기록매체로부터 자기장의 감응을 모의로 실험하기 위해 function generator에서 500 Hz의 주파수를 갖는 교류전류를 power amplifier (Inkel Professional Power Amplifier)로 증폭시킨 뒤 표준저항을 통해 Helmholtz 코일에 일정 교류전류를 인가시켜 모형소자에 수직교류자기장을 인가하였다. 이때 인가된 자기장의 세기를 gauss meter를 통해 확인하였으며, Helmholtz코일에 입력된 source signal은 오실로스코프의 채널1에 입력하였다. 외부자기장의 변화에 따라 모형소자가 감응하는 신호는 lock-in amplifier를 통해 1차적으로 확인하고,

Table 1. The experimental data used in computation model

Properties of each layer	Eperimental	
	values (I)	values (II)
SAL		
rho 1 ( $\mu\Omega\text{-cm}$ )	135	
t1 ( $\text{\AA}$ )	700	
$M_s1$ (G)	680	
$H_k1$ (Oe)	10.0	
MRL		
rho 2 ( $\mu\Omega\text{-cm}$ )	33	
t2 ( $\text{\AA}$ )	1000	
$M_s2$ (G)	800	
$H_k2$ (Oe)	5.0	
MSL		
rho 3 ( $\mu\Omega\text{-cm}$ )	90	
t3 ( $\text{\AA}$ )	300	
Dimension and current		
height ( $\mu\text{m}$ )	95	
width ( $\mu\text{m}$ )	200	
max. MR (%)	2.0	
sensing current (mA)	200	60

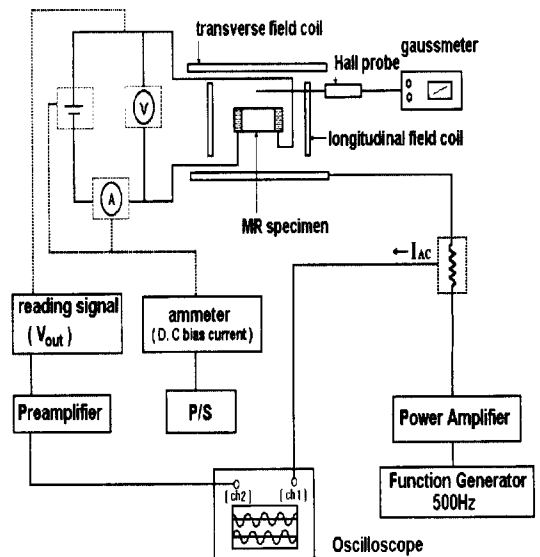


Fig. 2. Schematic diagram of reproducing output signal test system.

이때 출력신호(Vout)는 preamplifier내의 OPAMP를 통해 45배 증폭한다. 이 증폭된 response signal은 오실로스코프의 채널2에 입력하였다. 이상과 같은 방법으로 source signal과 response signal을 오실로스코프에 나타내어 모형소자의 재생출력능력을 검토하였다.

### III. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 3층 자기저항소자의 최적설계를 위한 컴퓨터계산 모형의 수립

스트라이프모양의 3층 자기저항소자에 있어 컴퓨터 계산모형연구를 위한 기본개념의 적용은 첫째, 박막층의 치수변화에 따른 형상변화효과 둘째, 박막자체가 보유하는 고유의 자기적성질에 대한 물성변수 셋째, 외부매체로부터 인가되는 자기장 및 감지전류에 의해 발생하는 자기장의 영향에 대한 검토가 필요하다.

본 연구에서 고려한 스트라이프모양의 3층 자기저항소자를 Fig. 3에 나타내었으며, 이를 기초로 컴퓨터 계산모형의 개념을 아래와 같이 적용하였다.

이때 소자가 갖는 전체에너지는 MRL, SAL, MSL 각 층이 갖는 여러 박막의 자기적특성을 바탕으로 ① anisotropy energy ② field energy ③ demagnetizing energy ④ coupling energy 등 4항의 합으로 나타낼 수 있다. 그리고 이론적 접근을 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

SAL과 MRL은 coupled된 Stoner-Wohlfarth 모형으로 처리하여 박막내의 anisotropy axes의 misorientation과 소자면 내에서 모든 인가자계의 방향은 균일하며, 박막소자의 형상이방성에 의해 발생하는 반자계의 값

은 평균값을 취한다. 또한 MRL, SAL, MSL의 각층은 무한평면으로 가정하고 edge effect를 무시하면, 이때 소자 층에 흐르는 감지전류가 발생하는 자기장은 Ampere법칙을 따른다. 따라서 3층박막에서 각 소자 층의 전기 및 자기적 물성값, 형상변화에 따른 두께(t), 폭(h), 길이(w) 그리고 외부자기장 및 감지전류 값(I)등을 계산의 변수로 각층의 에너지를 표현하면 다음과 같다.

3층 자기저항소자의 각층을 통해 흐르는 감지전류는 모든 층에 평행하며, 각각의 층들에서 전류와 관련된 자기장은 bias field로 작용한다. 즉 도체의 전류에 의해 발생된 주 bias field  $H_b$ 는 MRL과 SAL층 양자를 관통하며 서로 반대방향으로 그들의 자화를 회전시킨다. SAL과 MRL에서 유출되는 작은 바이어스자계에 포개지며, 자화를 더욱 회전시킨다. 이때 자기모멘트는 MRL에서 전류의 방향에  $45^\circ$ 를 이루나, SAL은 포화된다. 따라서 이들 연자성박막 층들 사이에 정자기적 coupling은 자화의 반평행방위를 갖는다.

컴퓨터 계산모형수립을 위한 각 소자 층의 표시(j=1~3)는 SAL=1, MRL=2, MSL=3으로 각각 정의하면, 이때 소자 층이 갖는 전기저항은 (1)식과 같다.

$$R_j = \rho_j \cdot \frac{w}{(t_j \cdot h)} \quad (1)$$

단,  $R_j$ : 각층의 전기저항,  $\rho_j$ : 각층의 비저항,  
 $t_j$ : 각층의 두께, h: 소자 폭, w: 소자 길이

3층 소자는 전기적으로 병렬 연결된 회로로 설정하여, 소자전체의 전기저항 및 전압에서 각층의 전류를 Ohm의 법칙으로 계산할 수 있다. 또한 3층 소자에 전류 I가 흐를 때 각 소자 층에서 발생하는 자기장  $H_i$ 를 Ampere법칙으로 표현하면 (2)식과 같다.

$$H_{i1} = \frac{\pi}{5} \cdot \frac{(I_1 + I_3)}{h}, \quad H_{i2} = \frac{\pi}{5} \cdot \frac{(I_2 + I_3)}{h} \quad (2)$$

단,  $H_{i1}, H_{i2}$ : SAL 및 MRL의 전류에 의해 발생한 자기장

스트라이프모양의 소자 층에서 형상이방성에 의해 발생하는 반자장의 세기  $H_D$ 는 (3)식으로 표현되며 여기서  $M_{sj}$ 는 각층의 포화자화값을 나타낸다.

$$H_D = 4\pi \cdot M_{sj} \cdot \left(\frac{t_j}{h}\right) \quad (3)$$

SAL과 MRL의 소자 층들이 갖는 이방성 에너지(anisotropy energy)를  $E_{sj}$ 로 나타내면 다음과 같다. 이때

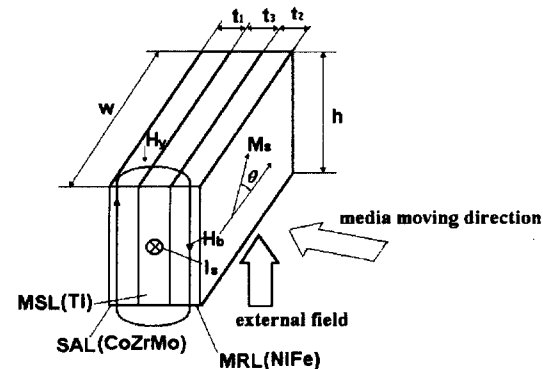


Fig. 3. A computational model of the rotation of magnetic moment in tri-layered MR stripe element.

박막내부에 일축자기이방성(uniaxial magnetic anisotropy)이 부여되어 있으며, 자화가 자화용이축 방향에서 임의의 각도  $\theta$ 만큼 회전할 때 박막의 이방성에너지는 다음의 식(4)로 된다.

$$E_{aj} = K_{uj} \cdot \sin^2\theta_j \cdot (t_j hw) \quad (4)$$

따라서 일축이방성상수는  $K_{uj} \cong 1/2 \cdot M_{sj} \cdot H_{kj}$ 와 같이 표현되며, 각층의 이방성에너지는 아래의 식 (5)로 결정된다.

$$E_{aj} = \frac{1}{2} \cdot M_{sj} \cdot H_{kj} \cdot \sin^2\theta_j \cdot (t_j hw) \quad (5)$$

단,  $E_{aj}$ : 각층의 이방성에너지,  $H_{kj}$ : 각층의 이방성자계값,  $\Delta v_j$  (t<sub>j</sub>hw): 각층의 체적

SAL과 MRL층이 소자 면에 수직한 외부자계(external field)와 각층의 감지전류에 의해 발생하는 자계에너지(field energy)를 결합하면, 이들 각층의 에너지 값을  $E_1, E_2$ 로 식 (6) 및 (7)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{E_1}{\Delta v_1} = \vec{M}_1 \cdot \vec{H}_1 = -M_{s1} \cdot (H_A + H_{i2}) \cdot \sin\theta_1 \quad (6)$$

$$\frac{E_2}{\Delta v_2} = -M_2^* \cdot H_2^* = -M_{s2} \cdot (H_A - H_{i1}) \cdot \sin\theta_2 \quad (7)$$

단,  $E_1$ : 외부자계에 의한 SAL층의 에너지,  
 $E_2$ : 외부자계에 의한 MRL층의 에너지,  
 $H_A$ : 외부로부터 인가된 자계값

각각의 소자 층에서 외부자계에 의한 자화방향에 반대로 작용하는 반자장을 소자의 형상에 따른 반자장 에너지(demagnetizing energy)로 표현하면 이들 각층의 값은  $E_{Dj}$ 로 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{E_{Dj}}{\Delta v_j} = \frac{1}{2} \cdot M_{sj} \cdot H_{Dj} \cdot \sin^2\theta_j \quad (8)$$

단,  $E_{Dj}$ : 각층에서 반자장에 의한 에너지,  
 $H_{Dj}$ : 각층의 자화각  $\theta_j = 90$  일때 반자장값

SAL과 MRL 각각의 소자 층에서 외부 자계에 의해 각층에서 발생하는 자계간의 상호작용에너지(coupling energy)는 각 소자 층의 에너지를 합하여 평균을 취하여 나타내면,  $E_C$ 로 식 (9)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} E_C &= \frac{1}{2} (-M_1^* \cdot M_{d2}^* t_1 - M_2^* \cdot H_{d1}^* t_2) \cdot hw \quad (9) \\ &= \frac{1}{2} (M_{s1} \cdot H_{d2} \cdot \sin\theta_1 \cdot t_1 + M_{s2} \cdot H_{d1} \cdot \sin\theta_2 \cdot t_2) \cdot hw \\ &= \frac{1}{2} (t_1 \cdot M_{s1} \cdot H_{D2} + t_2 \cdot M_{s2} \cdot H_{D1}) \cdot \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \cdot hw \end{aligned}$$

단,  $H_{d1}$ : SAL층의 자화각  $\theta = \theta_1$  일때 반자장값, 즉  $H_{d1} = H_{D1} \cdot \sin\theta_1$   
 $H_{d2}$ : MRL층의 자화각  $\theta = \theta_2$  일때 반자장값, 즉  $H_{d2} = H_{D2} \cdot \sin\theta_2$

이상의 과정에서 스트라이프모양의 3층 자기저항소자에 있어 컴퓨터계산모형 수립에 필요한 전자기적인 변수를 설정하였다. 따라서 각 소자 층이 갖는 계의 에너지는 이방성에너지, 자계에너지, 반자계에너지 및 상호결합에너지를 합한 값으로 나타낼 수 있다. 따라서 소자전체의 에너지는 각 박막 층의 에너지를 합한  $E_{TOTAL} = E_{SAL} + E_{MRL} + E_{COUPLING}$ 로 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} E_{TOTAL} &= \frac{1}{2} \cdot M_{s1} \cdot H_{k1} \cdot \sin^2\theta_1 \cdot (t_1 hw) \\ &+ \frac{1}{2} \cdot M_{s1} \cdot H_{D1} \cdot \sin^2\theta_1 \cdot (t_1 hw) \\ &- M_{s1} \cdot (H_A + H_{i2}) \cdot \sin\theta_1 \cdot (t_1 hw) \\ &+ \frac{1}{2} \cdot M_{s2} \cdot H_{k2} \cdot \sin^2\theta_2 \cdot (t_2 hw) \\ &+ \frac{1}{2} \cdot M_{s2} \cdot H_{D2} \cdot \sin^2\theta_2 \cdot (t_2 hw) \\ &- M_{s2} \cdot (H_A - H_{i1}) \cdot \sin\theta_2 \cdot (t_2 hw) \\ &+ \frac{1}{2} \cdot (t_1 \cdot M_{s1} \cdot H_{D2} + t_2 \cdot M_{s2} \cdot H_{D1}) \\ &\quad \cdot \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \cdot (hw) \quad (10) \end{aligned}$$

3층 소자에서 자화거동 및 자기저항의 예측을 위해서는 계의 전체에너지를 각층에서 자기장의 변화에 따른 자화방향에 대해 미분을 실시하면, 평형상태에서 박막내부의 자화방향에 따른 자기저항의 변화를 예측할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{TOTAL}}{\partial(\sin\theta_1)} &= \frac{\partial E_{SAL}}{\partial(\sin\theta_1)} + \frac{\partial E_{COUPLING}}{\partial(\sin\theta_1)} \\ &= [M_{s1}(H_{k1} + H_{D1}) \sin\theta_1 - M_{s1}(H_A + H_{i2})] t_1 hw \\ &+ \frac{1}{2} (t_1 M_{s1} H_{D2} + t_2 M_{s2} H_{D1}) \sin\theta_2 hw = 0 \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{TOTAL}}{\partial(\sin\theta_2)} &= \frac{\partial E_{SAL}}{\partial(\sin\theta_2)} + \frac{\partial E_{COUPLING}}{\partial(\sin\theta_2)} \\ &= [M_{s2}(H_{k2}+H_{D2})\sin\theta_2 - M_{s2}(H_A - H_{i1})]t_2hw \\ &+ \frac{1}{2}(t_1M_{s1}H_{D2} + t_2M_{s2}H_{D1})\sin\theta_1hw = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

계의 전체에너지를 최소로 하는 조건의 해를 구하기 위하여 다시 2차 미분을 실시하면 모두 양의 값을 가지므로 식(11)과 (12)로부터 계의 전체에너지를 최소로 하는 조건의 해는  $\frac{\partial E_{TOTAL}}{\partial(\sin\theta_1)}=0$ 와  $\frac{\partial E_{TOTAL}}{\partial(\sin\theta_2)}=0$ 일 때이다.

계의 전체에너지를 최소로 하는 조건의 해에서 외부 자기장의 변화에 따른 소자층의 자화방향을 각각 예측할 수 있으며, 이때 외부매체에서 인가되는 자장은 1 Oe의 등간격으로 자장을 +50~-50 Oe범위 변화시켰다. 외부자장의 변화에 따라 SAL과 MRL에서 자장의 변화에 따른 자화각도의 변화는 식(13) 및 (14)로 된다.

$$\begin{aligned} \sin\theta_1 &= \{ \{ (H_A + H_{i2}) \cdot M_{s1} \cdot t_1 \} \cdot \{ (H_{k2} + H_{D2}) \cdot M_{s2} \cdot t_2 \} \\ &- \{ H_A - H_{i1} \} \cdot M_{s2} \cdot t_2 \} \\ &\cdot \{ 1/2 \cdot (t_1 \cdot M_{s1} \cdot H_{D2} + t_2 \cdot M_{s2} \cdot H_{D1}) \} \\ &/ \{ \{ (H_{k1} + H_{D1}) \cdot M_{s1} \cdot t_1 \} \cdot \{ (H_{k2} + H_{D2}) \cdot M_{s2} \cdot t_2 \} \\ &- \{ 1/2 \cdot (t_1 \cdot M_{s1} \cdot H_{D2} \cdot M_{s2} \cdot H_{D1}) \} \}^2 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \sin\theta_2 &= \{ \{ (H_{k1} - H_{D1}) \cdot M_{s1} \cdot t_1 \} \cdot \{ (H_A + H_{i1}) \cdot M_{s2} \cdot t_2 \} \\ &- \{ 1/2 \cdot (t_1 \cdot M_{s1} \cdot H_{D2} + t_2 \cdot M_{s2} \cdot H_{D1}) \} \\ &\cdot \{ (H_A + H_{i2}) \cdot M_{s1} \cdot t_1 \} / \{ \{ (H_{k1} + H_{D1}) \cdot M_{s1} \cdot t_1 \} \\ &\cdot \{ (H_{k2} + H_{D2}) \cdot M_{s2} \cdot t_2 \} \\ &- \{ 1/2 \cdot (t_1 \cdot M_{s1} \cdot H_{D2} + t_2 \cdot M_{s2} \cdot H_{D1}) \} \} \end{aligned} \quad (14)$$

단 이때 SAL에서 자화각의 값  $\sin\theta_1 > 1$ 일 때는 양의 방향으로 포화된 것으로  $\sin\theta_1 = 1$ 로 하였으며, 이 경우의 MR층의 자화각도의 변화는 식 (15)로 나타낼 수 있다.

$$\sin\theta_2 = \frac{\{ \{ H_A(I) + H_{i1} \} \cdot M_{s2} \cdot t_2 \} - \{ \frac{1}{2} \cdot (t_1 \cdot M_{s1} \cdot H_{D2} + t_2 \cdot M_{s2} \cdot H_{D1}) \}}{\{ H_{k2} + H_{D2} \} \cdot M_{s2} \cdot t_2} \quad (15)$$

또한, MRL층에서 자화각의 값  $\sin\theta_1 > 1$ 일 때는 양의 방향으로 포화된 것으로  $\sin\theta_1 = 1$ 로 하였으며, 자화각의 값  $\sin\theta_1 < -1$ 일 때는 음의 방향으로 포화된 것으로  $\sin\theta_1 = -1$ 로 하였다.

이들의 자화각도의 계산결과를 토대로 자기저항 값의 변화는 아래의 식 (16)로 나타낼 수 있으며, 여기서,

MR(I)는 외부자장의 변화에 따른 자기저항 값을 나타낸다.

$$MR(I) = MR_{max} \cdot (\cos\theta_2) = MR_{max} \cdot (1 - \sin\theta_2 \cdot \sin\theta_2) \quad (16)$$

이상과 같은 수학적인 컴퓨터 계산모형은 식 (1)~(16)으로 표현되며, 3층 자기저항소자의 각층에서 외부 자장변화에 따른 자화거동 및 자기저항의 변화를 해석하는 프로그램을 작성하였다. 따라서 소자의 전체에너지를 자화각에 대해 각각 에너지를 최소화시키는 값으로 SAL의 바이어스에 의해 MRL의 자기저항곡선이 선형화영역을 갖게되는 조건을 소자의 최적설계조건으로 하는 컴퓨터계산모형을 수립하였다.

### 3.2 컴퓨터계산모형에 의한 소자의 설계

소자의 각층에서 박막의 자화는 외부자계에 의하여 전류방향으로 부터 만큼 회전하여 자화되므로 3층 자기저항헤드의 자기저항은 이러한 자화각  $\theta$ 에 의해 변화한다. 이때 소자의 전체에너지는 자화각에 대해 각각 에너지를 최소화시키는 조건이다. 이는 SAL에서 발생한 바이어스 자기장에 의해 MRL의 자기저항곡선이 선형화영역을 갖게되는 조건 즉 외부자장이 없을 때 MRL의 자화각 2가 45 부근일 때가 이상적인 소자의 설계가 된다. 이때 고려한 소자의 형상 및 물성에 대해 검토한 실험적인 설계변수의 값을 Table 1에 제시하였고, 이 변수들에 의해 설계된 소자 층들에서 대표적 바이어스 전류값 values (I)=200 mA와 values (II)=60 mA의 두 경우에 대해 자화방향 및 자기저항곡선의 계산결과를 Fig. 4에 나타내었다.

모형소자에 바이어스전류 values (I)=200 mA를 흘릴 때 검토한 실험적인 설계변수의 값으로 계산한 각 소자 층의 자화거동 및 자기저항곡선의 변화는 Fig. 4(a)와 같다. 즉, 외부자장이 없을 때 SAL에서 발생한 바이어스 자기장은 MRL의 자기저항곡선을 선형화영역으로 이동시키고, SAL의 자화각도 1은 전류방향에 90°로 포화되고, MRL의 자화각 2는 대략 40 부근으로 회전됨으로써 안정한 선형화영역이 확보됨을 알 수 있었다. 외부자기장이 인가되는 경우 자화각의 변화곡선에서 SAL의 자화각 1은 -6 Oe~+50 Oe까지 포화되며, -7 Oe~-50 Oe 범위에서는 자화각도가 외부자기장에 따라 변화되었다. 또한 MRL의 자화각 2는 -7 Oe~+25 Oe 범위 내에서 자화곡선의 변화가 안정되게 나타나고 있으며, -7 Oe 이하와 +25 Oe 이상의 범위

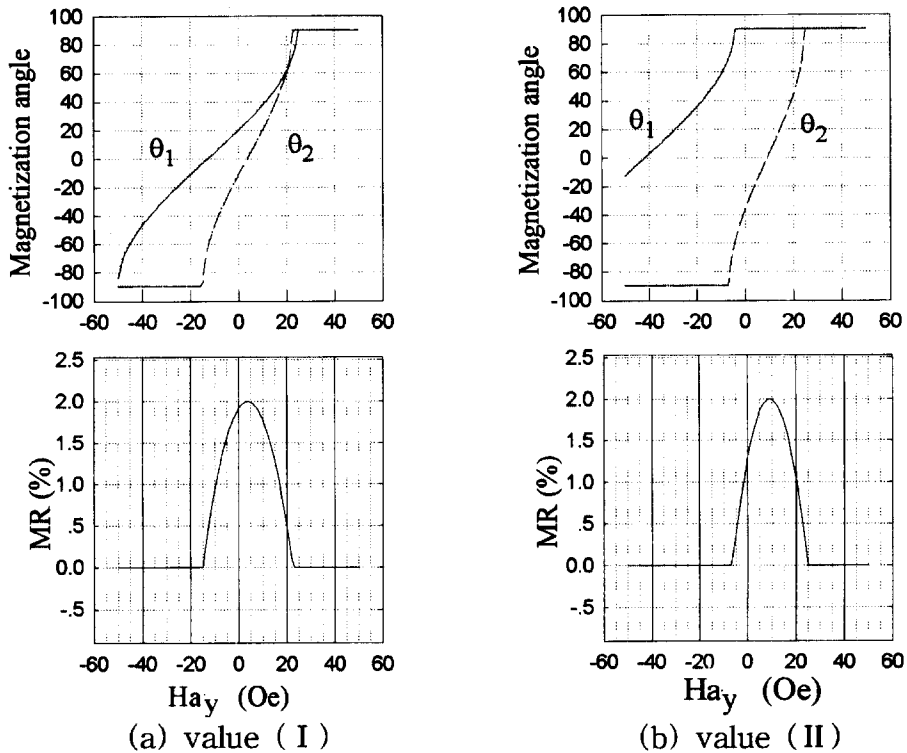


Fig. 4. Dependence of magnetization angle of MRL ( $\theta_2$ ) & SAL ( $\theta_1$ ) and MR ratio at each layer on applied field intensity in the optimized tri-layered MR element, which is theoretically computed model by experimental values (I) and (II).

에서  $90^\circ$ 로 포화되기 때문에 외부자기장에 따라 자화 각도의 변화가 일어나지 않았다. 따라서 이 조건에서 설계된 3층 자기저항소자는 외부자장의 변화가 없는 경우 우수한 선형성이 확보되는 구간을 확보하며, 외부자장  $-7 \text{ Oe} \sim 25 \text{ Oe}$  범위 내에서 소자로서 사용이 가능한 이상적인 설계조건을 만족한 것으로 계산되었다.

그러나 최초의 설계조건에서 실제 3층 자기저항소자를 제작하여 최적 바이어스 전류조건인  $I=200 \text{ mA}$ 에서 자기저항 응답곡선을 측정하기 위해 전류를 증가시키면서 실험 중 Joule 열의 발생에 의해  $I=100 \text{ mA}$  부근에서 소자 층이 파괴됨을 관찰할 수 있었다. 이때 실제 소자가 바이어스 전류에 의해 손상 받는 한계 파괴 전류밀도( $J_b$ )를 아래 식 (17)로 구해보았다[4].

$$J_b = \frac{I_b}{t_b \cdot h} \tag{17}$$

단,  $I_b$ : 바이어스 전류,  $t_b$ : 바이어스 층의 두께,  $h$ : 소자의 폭

이때 한계 파괴전류밀도는  $J_b \approx 10^{10} \text{ A/m}^2$ 로 나타났으며, 이는 소자의 설계 시 바이어스 전류  $I_b$ 를 결정하는 중요한 변수로 판단된다. 따라서 소자의 안정성을 확보하기 위해 실험에서 바이어스 전류는  $I \leq 60 \text{ mA}$ 로 제한하였다.

모형소자에 바이어스 전류 values (I) = 60 mA를 흘릴 때 실험적인 설계변수의 값으로 계산한 각 소자층의 자화거동 및 자기저항곡선의 변화를 검토한 결과는 Fig. 4(b)와 같다. 외부자기장이 인가되지 않았을 때 SAL의 자화각도 1은 전류방향에  $+20^\circ$  기울어져 있으며, MRL의 자화각도 2는 전류방향에  $-10^\circ$  기울어져 있다. 이는 소자에 흐르는 바이어스 전류에 의해 SAL의 자기모멘트가 포화에 이르지 못하는 못하였으나 MRL의 자화방향과 반대 방향을 유지하였다. 이는 SAL층에서 발생하는 자기장이 MRL에 바이어스 자기장을 형성시켰음을 알 수 있었다. 따라서 자기저항곡선의 선형화 영역으로의 이동정도를 확인키 위해 MRL의 자화각도가 전류방향과 평행한  $\theta_2 = 0^\circ$ 일때 자기저항곡선을 확인한 결과 자기저항곡선의 변곡점이  $4 \text{ Oe}$  이동되었음

을 알 수 있었다. 이는 자기저항 곡선상 완전한 선형화 영역을 확보하지는 못하였으나, 소자의 재생출력신호를 확대할 수 있는 설계조건이라 판단된다. 외부자기장이 인가되는 경우 자화각도의 변화곡선에서 SAL의 자화각도 1은 +23 Oe 이상 부터 포화되며, +23 Oe~ -50 Oe 범위에서는 자화각도가 외부자기장에 따라 변화되었다. MRL의 자화각도 2는 -15 Oe 이하와 +22 Oe 이상의 범위에서 90°로 포화되기 때문에 외부자기장에 따라 자화각도의 변화가 일어나지 않았다. 따라서 이 구간들에서는 자기저항소자로서 사용이 불가능한 구간으로 계산되었다. -15 Oe~+22 Oe범위에서 자화각 2는 포화되지 않고 외부자기장에 따라 자화각도의 변화가 일어났다. 따라서 이 구간 내에서 외부자기장의 변화에 따라 자기저항의 변화가 일어나기 때문에 자기저항소자로 사용 가능한 것으로 계산되었다.

### 3.3 소자의 제작 및 전자적 특성

컴퓨터계산모형에 의해 이론적으로 설계된 모형소자를 실제소자의 형상으로 음각 패턴된 스텐레스 마스크를 이용하여 각 합금 박막을 연속 스퍼터 공정으로 3층의 박막을 증착한 뒤, 적정 열처리조건인 300 °C,

200 Oe의 자장중 열처리를 실시하였다. 이때 박막의 제조 및 열처리조건은 앞서 발표된 연구결과들에서 설정된 조건을 토대로 실시하였다. 열처리 후 실제 3층 소자 양단에 전극을 입혀 최종 실험소자를 Table 1의 규격되로 제작하였으며, 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 또한 실제 제작된 3층 자기저항소자의 자기저항응답 및 외부자기장의 변화에 따른 재생출력신호특성을 검출하기 위하여 Fig. 2의 측정장치를 사용하였다.

3층 자기저항소자에서 자기저항곡선을 선형화 영역으로 이동정도를 확인하기 위해 소자내부에 D.C. 정전류를 10 mA씩 증가시켜 60 mA까지 흘려 소자내의 수직바이어스자장을 인가하였다. 이때 소자 내에서의 자기저항응답 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

이때 계산모형에 의해 모의 실험된 자기저항 값과 실제 제작된 소자사이의 자기저항 값이 2 %에서 0.6 %로 감소함을 보였는데 이는 모의실험에 사용된 자기저항 값은 단층에서의 자기저항 값을 적용하였으나, 실제소자의 경우 3층의 증착 및 열처리에 따른 박막층과 층 사이에서의 상호 확산효과의 기여에 따른 자기저항 값의 열화를 일으킨 것으로 판단된다. 따라서 향후 이에 대한 원인 파악을 위한 연구가 요구되고 있

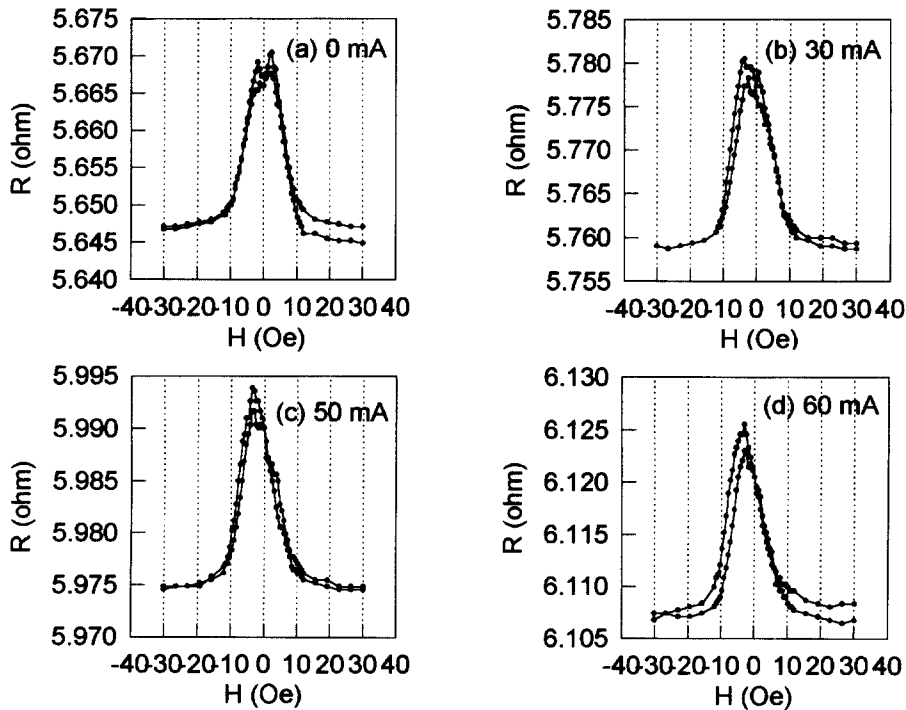


Fig. 5. MR response curve of real tri-layered MR element with D.C. biasing current.

다. 또한 바이어스 전류의 증가에 따른 소자에서의 자기저항 값의 증가는 전류의 증가에 따른 3층 소자 내에서 Joule 열의 발생에 의해 것으로 나타났다.

또한, 자기저항소자에 공급된 바이어스 전류 0~30 mA까지는 SAL에 의해 MRL의 자기저항곡선이 선형화영역으로의 이동이 일어나지 않았고, 자기저항곡선은 외부자기장±5 Oe부근에 영역에서 곡선이 일그러지는 것으로 보아 Barkhausen잡음을 나타내는 것으로 판단된다[11]. 바이어스전류 40~50 mA까지 자기저항곡선이 선형화영역을 확보하기 위해 좌측으로 약 3 Oe 이동되었으나, 아직 곡선이 부분적으로 일그러지는 것으로 보아 Barkhausen잡음을 나타내고 있다. 바이어스전류 60 mA의 경우 자기저항곡선이 선형화영역을 확보하기 위해 좌측으로 약 4 Oe 이동되었으며, 곡선

이 거의 포물선형태를 유지하고 일그러짐이 없는 것으로 보아 Barkhausen잡음을 나타내지 않았다. 이로부터 바이어스전류 60 mA가 소자 내에 흐를때 SAL에서 충분한 수직바이어스 자계가 발생하여 MRL의 자기저항곡선을 선형화영역으로 이동시키며, MRL내의 자구는 단자구형태로 유지되어 Barkhausen잡음을 제거시킨 것으로 판단된다.

자기저항소자가 외부기록매체로 부터 자기장의 감지 및 재생출력을 모의로 실험하였다. Fig. 6은 실제 제작된 모형소자 내에 바이어스전류 60 mA가 흐를 때 외부자기장의 변화에 따라 재생출력 파형을 조사한 것이다. 소자에 인가되는 자기장은 RMS값을 사용하였고, 신호검출시 time division은 0.5 μsec/div이었다. 또한 source 및 response signal의 output division은 0.5

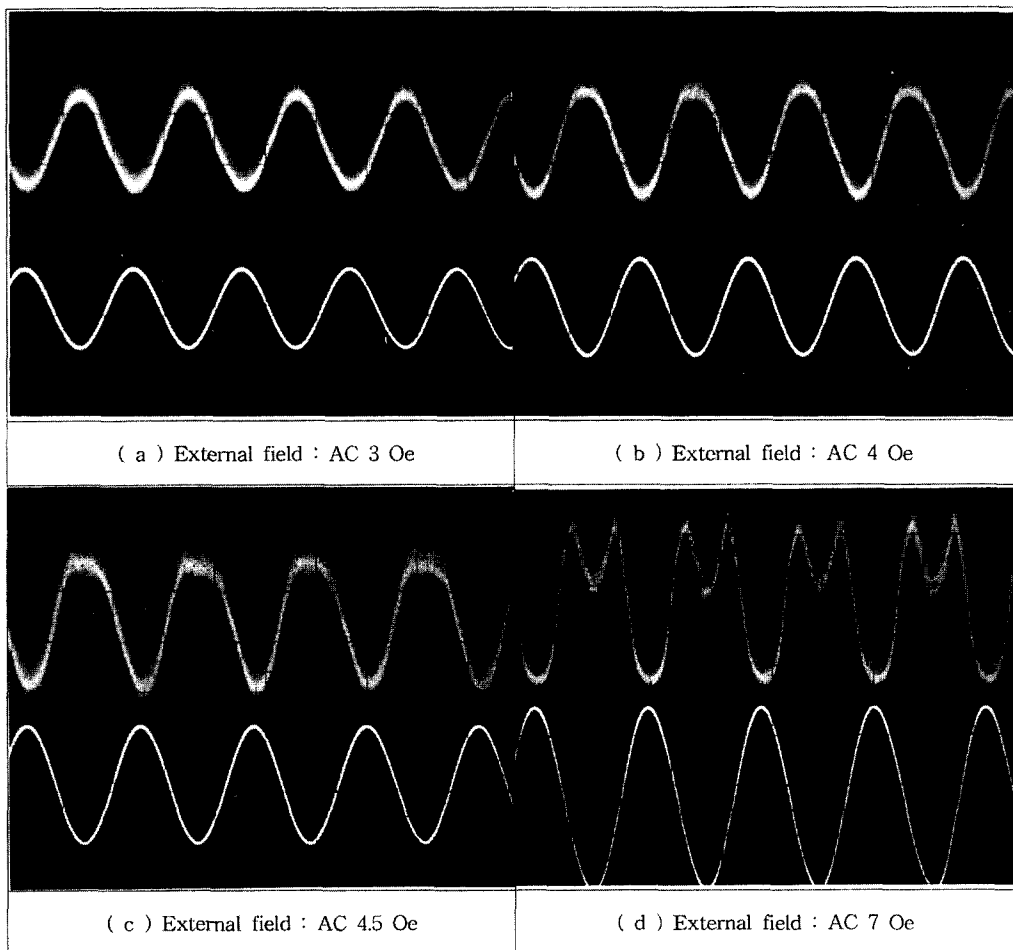


Fig. 6. Output reading signal waveforms of tri-layered MR element according to external applied field (channel 1 : source signal, channel 2 : response signal).



V/div 및 10 mV/div 이었다.

외부자기장이 1 Oe에서 4 Oe 범위까지 증가할 수록 소자의 재생 출력신호는 정현파의 곡선을 유지하고 있다. 또한 source signal이 증가할 수록 response signal의 출력전압도 계속해서 증가하고 있다. 따라서 컴퓨터모형소자의 계산 결과인 Fig. 5(d)로부터 예측할 수 있었던 것처럼 자기저항곡선이 바이어스자장에 의해 선형화구간으로 약 4 Oe 이동된 것으로 보아 이 구간 내의 외부매체로부터 인가되는 자기장에서 정상적인 소자로서 작동이 가능하다고 판단된다. 외부자기장이 4.5 Oe에서 7 Oe 범위까지 증가할 수록 자기저항곡선상의 선형화영역을 벗어나며, 소자의 재생 출력신호는 정현파에서 부분적으로 일그러짐을 보였다. 또한 source signal이 증가할 수록 response signal의 출력전압도 계속해서 증가하고 있으나, 정현파 일 때 보다 증가의 폭이 감소되었다. 이는 모형소자 내 자기저항곡선이 선형화구간으로 약 4 Oe 이동된 것을 고려하면, 인가자기장이 이 구간 밖으로 작용하므로 자기저항곡선의 변곡점을 지나는 영역만큼 정현파의 형태가 일그러지기 때문이다. 반면 자기저항곡선의 변곡점 반대영역으로 자기장이 인가되는 부분은 정현파를 갖기 때문에 전체 response signal은 증가했으나, 증가폭은 감소되었다.

이상의 실제 제작된 모형소자의 재생출력신호 검출 결과로 판단할 때, 기존의 자기기록매체에서 누설되어 헤드에 인가되는 자기장의 세기가  $\pm 5$  Oe 범위 이내라는 보고[12, 13]를 토대로 하면, 3층 자기저항소자는 헤드로 적용이 가능한 것으로 기대된다.

#### IV. 결 론

코밀도 자성박막헤드 및 센서용 자기저항소자는 크기가 수십  $\mu\text{m}$  이하의 소형이므로 제조 및 설계가 주요 연구대상이 된다. 따라서 컴퓨터 계산모형을 통한 소자의 이론적설계와 실제 제작한 소자의 재생출력특성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 3층 자기저항소자의 각층에서 내부 자화과정과 자기저항변화를 예측하여 소자의 최적설계를 가능케 하는 이론적 컴퓨터계산모형을 수립하였다. 이는 재료 과학에서 중요시되고 있는 박막물성을 제어하는 진공 증착 기술과 소자제작의 효율적인 제조공정으로 사용하는데 유익할 것이다.

2. 컴퓨터 모형계산에 의해 설계된 소자의 자기저항 곡선은  $-15$  Oe ~  $+22$  Oe 영역에서 안정된 곡선을 유지하며, 선형화 영역으로 4 Oe 이동된 결과를 보였다. 한편, 실제 제작한 소자의 자기저항 응답곡선은 15 Oe 영역에서 안정된 곡선을 유지하며, 선형화영역으로 약 4 Oe 이동되었다. 이는 컴퓨터 모형계산결과와 유사한 결과를 보였다.

3. 실제 제작한 소자에서 재생 출력신호의 실험결과 외부매체의 자장범위 1~4 Oe에서 정현파를 유지하였다. 따라서 이 구간 내에서 재생출력을 위한 헤드의 소자로 양호한 작동이 가능한 것으로 나타났다.

4. 3층 자기저항소자 층을 흐르는 바이어스 전류에 의해 발생하는 실제소자의 한계 파괴전류밀도는  $J_c \approx 10^{10}$  A/m<sup>2</sup>로 나타났으며, 소자의 안정성을 확보하기 위한 바이어스 전류는  $I \leq 60$  mA로 제한되었다.

#### 감사의 글

본 논문은 (주) 대우전자 영상매체팀의 많은 협력에 의해 이루어 졌음에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] C. D. Mee and E. Daniel, Magnetic Recording 1 McGraw-Hill, (1987).
- [2] T. D. Beaulieu and D. A. Nepela, U.S. Patent 3, 840, 898.
- [3] P. Ciureanu and H. Gavrilă, Magnetic heads for digital recording, Elsevier, 568 (1990).
- [4] P. Ciureanu and S. Middelhoeck, Thin film resistive sensors, IOP, 310 (1992).
- [5] F. Jeffers etc, IEEE Trans. Magn. 21, 1563 (1985).
- [6] S. H. Liao, S. W. Yuan, and H. N. Bertram, IEEE Trans. Magn. 29, 3873 (1993).
- [7] C. Tsang, IEEE Trans. Magn. 25, 3692 (1989).
- [8] J. A. C. van Ooyen, W. F. Druyvesteyn, and L. Postma, J. Appl. Phys. 53, 2596 (1982).
- [9] 김용성, 서수정, 송용진 외, 한국자기학회지 6(4), 242 (1996).
- [10] 서수정, 송용진, 김용성 외, (주) 대우전자 기술연구소, 기술보고서, 211 (1996).
- [11] N. Smith, J. Appl. Phys. 63, 2932 (1988)
- [12] T. Maruyama, K. Yamada, T. Tatsumi, H. Urai, IEEE Trans. Magn. MAG-23, 2503 (1988).
- [13] K. Yamada, T. Maruyama, M. Ohmukai, T. Tatsumi and H. Urai, J. Appl. Phys. 63, 4023 (1988).

## The Fabrication and Reproducing Signal Characteristics of Tri-layered Magnetoresistance Element

**Y. S. Kim, J. C. Ro, H. S. Park and S. J. Suh**

*Department of Metallurgical Engineering, Sungkyunkwan University  
300, Chunchun-dong, Jangan-ku, Suwon 440-746, Korea*

**K. C. Kim, Y. J. Song**

*Department of Physics, Ajou University  
5, Wonchun-dong, Paldal-ku, Suwon 442-749, Korea*

(Received 18 April 1998, in final form 19 August 1998)

We investigated that the fabrication and reproducing signal characteristics of tri-layered magnetoresistance (MR) element for the high density magnetic thin film heads and sensors. Magnetoresistance curve of tri-layered MR element predicted by computer modeling was saturated above external field of  $-15$  Oe  $\sim$   $+22$  Oe, and it was shifted to linearized region as large as 4 Oe. In the case of fabricated real device, magnetoresistance curve was saturated above external field of  $\pm 15$  Oe, and it was shifted to linearized region as large as 4 Oe. As shown in real device, MR response curve was in good agreement with the simulation results. As a result of experimental data of reproducing output signal in real device, it retained normal sinusoidal waveforms in 1~4 Oe external magnetic field. In this magnetic field region, the fabricated heads with tri-layered MR element can be operated with good reproduced characteristics. This will be beneficial to the use of efficient processes of manufacturing elements and the vacuum deposition techniques which control thin film properties.