

Tb/ Co 조성변조 다층박막의 자기 및 광자기적 성질에 관한 연구

홍석지 · 김상록 · 이성래

고려대학교 공과대학 재료 금속공학부

서울특별시 성북구 안암동 5-1, 136-701

(1996년 3월 25일 받음, 1996년 7월 17일 최종수정본 받음)

동시진공증착으로 제조한 Tb/Co 조성변조 다층박막의 자기적 성질 및 광자기적 성질을 Tb의 두께 및 Tb/Co 각 층의 두께 비에 대하여 연구하였으며 열처리시 자기적 거동의 변화를 분석하였다. Tb의 두께가 12 Å일 때가 가장 큰 범위에서 수직자기이방성을 보였고, 최고 6.52×10^6 erg/cc의 수직자기이방성 에너지를 얻었다. Tb의 두께가 12 Å에서 최대 수직자기이방성을 보이는 것은 Tb/Co 계면에서의 Tb-Co 이중 원자쌍뿐만 아니라 Tb-Tb, Co-Co 동종 원자쌍도 수직자기이방성에 기여하기 때문으로 사려된다. Kerr 회전각(θ_K)은 수직자기이방성 에너지(K_u)와 비례, 평균 스핀분산각(α)과는 반비례하는 거동을 보였으며 Tb 두께 12 Å, 두께비 1.55에서 최대 Kerr 회전각 0.28°를 얻었다. 열처리시 나타나는 비정상적인 이력곡선은 Tb층의 우선적인 산화로 Tb의 유효조성이 감소하여 조성이 보상점 근처로 이동하게 되어 Co층과의 보자력 차이가 커져서 나타난다.

I. 서 론

중희토류 금속(Gd, Tb, Dy)과 천이 금속(Fe, Co)의 비정질 합금박막은 특정한 조성범위에서 박막면에 수직인 수직자기 이방성(perpendicular magnetic anisotropy)과 큰 보자력을 가지며 polar Kerr 효과 등 특이한 자기적 성질로 인하여 고밀도 광자기 기록재료로 응용이 되고 있다. 이러한 희토류-천이금속의 비정질 합금박막은 Chaudhari[1]에 의해 스퍼터 제작한 Gd-Co 합금박막이 수직자기이방성을 갖는다는 발표 이래 Gd-Fe[2, 3], Tb-Fe[4, 5] 등의 2상 합금박막과 이들 2상 합금박막의 광자기 특성을 향상시키기 위한 Gd-Tb-Fe[6, 7], Tb-Fe-Co[8-10] 및 Gd-Fe-Co[11, 12]. 등의 3상 합금 및 4상 합금[13]에 대한 연구가 진행되어 왔으며 현재는 3상 및 4상 합금 등이 실용화가 되고 있다.

수직자기이방성의 원인은 동종 원자쌍의 이방성적 분포에 의한 atomic pair ordering 모델[14, 15], Tb합금의 경우에는 단이온 이방성(single-ion anisotropy) 모델[16], 교환이방성(exchange anisotropy) 모델[17-19], 기관과 박막간에 존재하는 응력에 의한 이방성(stress induced anisotropy) 모델[20-22] 등이 제시되어 있으나 분명한 원인 규명에는 아직 미흡하며 여러 요인 복합적으로 작용하는 것으로 보인다. 전하분포가 구형인 S state인 Gd 계의 비정질 합금박막은 주로 동종 원자쌍(RE-RE, TM-TM)의 이방성적 분포가 주로 수직자기이방성에 기여하는 것으로, F state인 단이온 이방

성을 갖는 Tb계는 이중 원자(RE-TM)쌍이 수직자기이방성에 주로 기여하는 것으로 분석하고 있다. 따라서 Tb계의 경우 RE/TM 다층박막을 제조하면 인위적으로 RE-TM 이중 원자쌍을 가장 효과적으로 만들 수 있고, 수직자기이방성 에너지의 증가를 기대할 수 있다. N. Sato[23]는 Tb/Fe 조성변조 다층박막에 대해 동일한 조성에서 Tb의 두께변화에 따른 자기적 성질을 측정할 결과 Tb의 두께가 단원자층 두께일 때(약 4 Å)가 가장 큰 수직자기이방성을 보이므로 Tb-Fe 이중 원자쌍의 이방성적 분포가 수직자기이방성의 주 원인이라고 보고하였다. Z. S. Shan[24] 등은 이중 원자쌍의 이방성적 분포에 의한 기여뿐만 아니라 스핀-궤도의 coupling에 관계되는 희토류 이온의 단이온 이방성(single-ion anisotropy)에 기초한 모델로 RE/TM 조성변조 다층박막의 수직자기이방성 원인을 설명하고 있다. 이미 발표된 Tb/Fe 다층박막의 연구[25]에서 Tb층의 두께가 8 Å(3원자층)에서 최대 수직자기 이방성에너지(5×10^7 erg/cm³)를 얻었으며 이는 Tb-Fe 이중 원자쌍뿐만 아니라 Tb-Tb 및 Fe-Fe 동종원자 쌍 및 단이온 이방성도 수직자기이방성에 기여하는 것으로 보인다.

본 연구에서는 큰 단이온 이방성을 갖는 Tb과 교환적분(exchange integral) 값이 Fe보다 큰 Co를 사용한 Tb/Co 조성변조 다층박막의 두께비(d_{RE}/d_{TM}) 변화와 동일 두께비에서 Tb층의 두께변화에 따른 자기 및 광자기적 성질의 최적 조건을 구하였다. 그리고 우수한 광자기적 성질을 보인 RE-rich 조성의 시편에 대해 시효실험하여 자기적 성질의 변화를 분석하였다.

II. 실험 방법

시편의 제작

본 연구에 사용된 Tb/Co 다층박막은 순도 99.9% Research Chemical사 제품의 Tb과 순도 99.9%의 Co를 사용하였고, 2대의 quartz crystal oscillator (XTC)에 의해서 각 원소의 증착 속도 및 증착된 두께가 자동 측정 및 제어되는 동시 열 진공증착장치 (automatic controlled thermal co-evaporator)를 사용하여 제작하였다.

PC로 제어되는 서터를 증착장치 내에 장착하고 이 서터가 각 source를 개폐하는 동작을 반복하도록 하여 다층박막을 제작하였다. 각 층의 두께는 서터의 개폐시간과 각 원소의 증착 속도를 제어하여 조절하였다 [25].

기판으로는 Hall 전압 측정을 위해 Cu 전극을 미리 피복 시킨 두께 1mm의 슬라이드 유리를 사용하였다. Tb 층의 두께는 4~16 Å, Co 층의 두께는 2~17 Å, 변조주기 (modulation wavelength)는 6~33 Å, 그리고 Tb 층과 Co 층의 두께비 (d_{Tb}/d_{Co})는 0.9~2로 하였다. 자성막의 총 두께는 약 5000 Å으로 하였으며 그 위에 Tb의 산화를 막기 위한 보호막으로 SiO를 약 700 Å 피복하였다.

자기적 특성 및 Hall 이력곡선의 측정

Tb/Co 다층박막의 포화자화 (M_s)와 수직자기이방성 에너지 (K_u) 측정은 Miyajima [26] 등이 제시한 토모크 자력계를 이용하여 구하였다. 본 실험에 사용된 Hall 전압 측정 장치는 Keithley사 181 nanovoltmeter, 179A multimeter, 228 voltage/current source 이었으며 모든 측정장치는 IBM PC와 IEEE488 interface로 연결하여 Data의 수집 및 제어를 하였다.

측정된 Hall 이력곡선의 포화 Hall 전압 (V_{HS})과 잔류 Hall 전압 (V_{HR})의 비로부터 평균 스핀분산각 (α)을 다음 식 [27]에 의하여 결정하였다.

$$\alpha = \cos^{-1} (V_{HR} / V_{HS})$$

Polar Kerr 회전각 측정

Kerr 회전각 (θ_K)은 Kerr 회전각 이력곡선 측정 장비를 이용하여 구했다. 반도체 laser diode에서 나온 $\lambda = 8300 \text{ \AA}$ 의 laser beam을 선편광 시킨 후, 자화된 박막에 조사시켰다. 반사된 laser 광은 Faraday Cell에서 ω 의 주파수로 변조하여 편광기를 통과한 후 Faraday cell 및 편광기와 일직선상에 놓여있는 광검출기 1 및 편광기와

90°를 이루는 광검출기 2를 통과하여 differential amplifier와 power amplifier에서 ω 만 선택 증폭하여 X-Y recorder에서 X축은 자장 Y축은 증폭 신호 축으로 하여 이력곡선을 측정 하였다. 한편 θ_K 의 측정 방향은 기판 쪽으로 하였다.

시효실험

RE-rich 조성의 시편을 Cu turning로와 pyrogallic acid를 이용하여 탈산처리한 Ar분위기에서 시효실험을 하였다. 시효온도는 100, 200, 300 °C였으며 시효시간은 5분에서 5시간까지 하였다. 시효 처리 후 시편을 상온으로 급냉한 다음 Hall 이력곡선을 측정하여 자기적 성질을 구하였다.

III. 실험결과 및 고찰

증착된 상태의 자기적 특성

Fig. 1은 Tb의 두께가 8 Å일 때 두께비 (d_{Tb}/d_{Co}) 변화에 따른 수직자기이방성 에너지 (K_u), 포화자화 (M_s), 보자력 (H_c)의 변화를 나타낸 것이다. M_s 는 두께비가 증가함에 따라 점차 감소하여 최소치를 보인 후 다시 증가하는 양상이다. H_c 는 M_s 가 최소치를 보이는 두께비에서 급격히 증가하였다가 다시 감소하고 있다. 위와 같은 M_s , H_c 변화 양상은 준강자성 결합 (ferrimagnetic ordering)을 하는 중희토류금속-3d 강자성 합금박막이 보상 조성 근처에서 보이는 전형적인 형태로서 Tb/Co 조성 변조 다층박막도 합금박막과 같이 Tb 원자와 Co 원자가

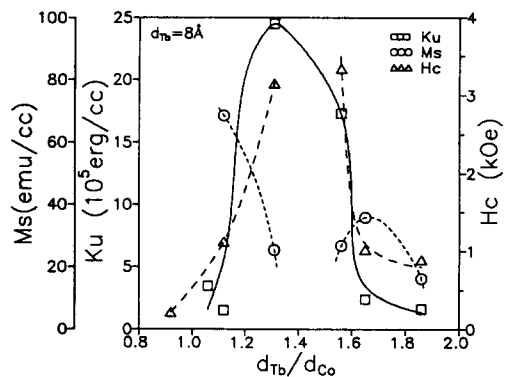


Fig. 1 Variations of perpendicular anisotropy energy constant K_u , saturation magnetisation M_s , and coercivity H_c of Tb 8 Å/Co as a function of thickness ratio.

준강자성 결합을 함에 따라 두께비 1.45 근처에서 보상점을 가지고 있음을 알 수 있다. 두께비 1.45 이상인 Tb-rich 영역에서의 자화값은 Tb의 부격자 자화(sublattice magnetization)의 크기에 의해 정해지는데 Tb-Tb 원자쌍의 교환적분(exchange integral)값이 작아[28] Tb의 양이 한계값을 넘으면 스핀정렬이 흐트러져 net 자기모멘트의 감소로 전체 자화값은 감소하게 된다. K_u 는 점차 증가하여 두께비 1.31에서 최대치 2.45×10^6 erg/cc 값을 보였다. Fig. 2는 위의 조건에서 Hall 이력곡선의 변화를 나타낸 것이다. 두께비 1.45를 기준으로 이력곡선의 극성(polarity)이 바뀌고있어 이 근처에서 보상점을 갖고 있음을 알 수 있다. 보상점 근처에서 수직자기이방성과 보자력이 크므로 Hall 이력곡선의 사각성은 좋다.

Fig. 3은 두께비가 1.53일 때 변조주기 $\lambda (= d_{Tb} + d_{Co})$ 변화에 따른 수직자기이방성 에너지(K_u), 포화 Hall 전압(V_{HS}) 및 보자력(H_c)의 변화를 나타낸 것으로

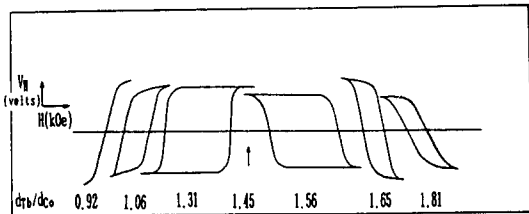


Fig. 2 Changes of Hall hysteresis loops of Tb 8 Å / Co as a function of thickness ratio.

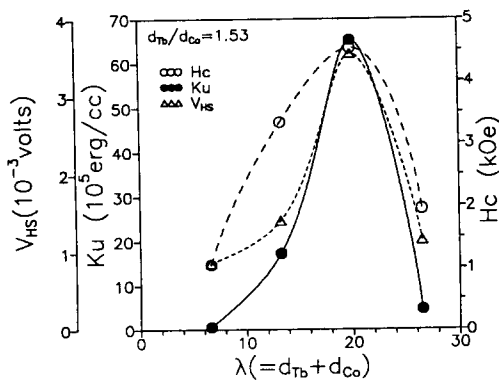


Fig. 3 Variations of perpendicular anisotropy energy constant K_u , saturation Hall voltage V_{HS} , and coercivity H_c of Tb / Co with $d_{Tb} / d_{Co} = 1.53$ as a function of modulation wavelength.

$\lambda = 19.9 \text{ \AA}$ ($d_{Tb} = 12 \text{ \AA}$)일 때 최대값을 보이고 있다. Tb층의 두께가 12 \AA 인 경우 두께비 1.53에서 Tb/Co 조성변조 다층박막 중 최고치의 수직자기이방성 에너지(K_u)값, 6.52×10^6 erg/cc을 얻었다.

N. Sato와 K. Habu[23, 29, 30]에 의하면 RE/TM 조성변조 다층박막의 수직자기이방성은 박막면에 수직하게 배열된 RE-TM 원자쌍의 이방성적 분포에 기인하므로 RE-TM 원자쌍의 밀도가 가장 클 때 즉, RE가 한 원자층($d_{Tb} = 4 \text{ \AA}$)일 때 최고의 수직자기이방성을 나타낸다고 보고한 바 있다. 본 실험에서는 Tb이 12 \AA (약 3원자층)일 때 최고의 수직자기이방성을 얻었다. 이러한 결과는 계면에서의 Tb-Co 이중 원자쌍뿐만 아니라 Tb-Tb, Co-Co 동종 원자쌍도 수직자기이방성에 중요하게 기여하기 때문이라고 생각된다. Tb/Fe 조성변조 다층박막의 경우는 Tb이 8 \AA 에서 최대 K_u 값을 얻었다.[25] Tb/Fe와 Tb/Co가 최대 수직자기이방성을 보이는 Tb의 두께에 차이가 있는 것은 교환 결합에너지 차가 가장 큰 원인이다. Fe-Fe 원자쌍의 교환적분값 $J_{Fe-Fe} = 8.5 \times 10^{-15}$ 에 비해 Co-Co 원자쌍의 교환적분값은 $J_{Co-Co} = 2.4 \times 10^{-14}$ 로 [31] 약 3배정도 큰 값이다. 그리고 이중 원자쌍의 경우도 Tb-Co가 Tb-Fe보다 교환적분값이 크다. ($J_{Tb-Fe} = 1.0 \times 10^{-15}$, $J_{Tb-Co} = 2.4 \times 10^{-15}$) 따라서 Tb/Co 조성변조 다층박막의 경우 Tb 3원자층($d_{Tb} = 12 \text{ \AA}$)까지는 완전한 coupling을 하고 있다고 볼 수 있다. Fig. 4는 수직자기이방성을 나타내는 범위에 관한 것으로 Tb이 12 \AA 일 때가 가장 넓은 범위($d_{Tb} / d_{Co} = 0.93 \sim 1.81$)에서 수직자기이방성을 보이고 있다. Tb/Fe의 경우에는 Tb이 8 \AA 일 때 가장 넓은 범위에서 수직자기이방성을 보였는데 이러한 차이도 앞에서 설명한 교환결합에너지의 차이 때문으로 보인다.

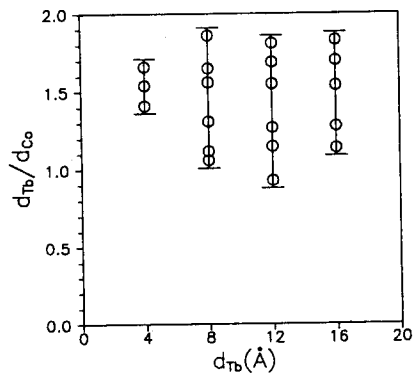


Fig. 4 The range of the thickness ratio exhibiting a perpendicular anisotropy in Tb / Co.

증착된 상태의 광학적 특성

Fig. 5는 Tb의 두께가 8, 12 및 16 Å일 때 두께비 변화에 따른 Kerr 회전각의 변화이다. 두께비가 증가함에

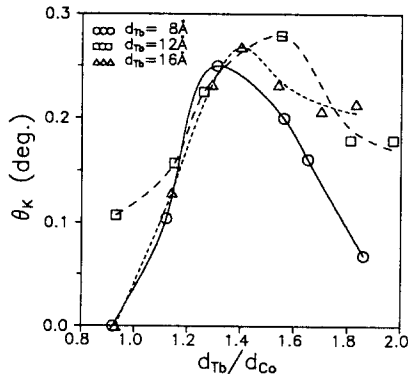


Fig. 5 Variations of Kerr rotation angle as a function of thickness ratio for $d_{Tb} = 8, 12, \text{ and } 16\text{Å}$.

따라 Kerr 회전각은 점차 증가하여 최대치를 보인 후 다시 감소하고 있다. RE-TM 합금박막의 경우[32] 일반적으로 RE의 양이 증가함에 따라 θ_K 는 직선적으로 감소한다. 이것은 Kerr 회전각이 가시광선에서 적외선까지의 장파장의 laser beam에 대하여 주로 TM의 자화값에 의존하기 때문이다. 일반적으로 Kerr 회전각의 크기는 스핀-궤도 결합 (spin-orbit coupling)과 스핀분극 (spin polarization), laser광자 에너지 ($\lambda = 632\text{ nm}, 1.96\text{ eV}$)와 상호작용 할 수 있는 Fermi 준위 근처의 전자의 상태 밀도 및 p-d 또는 TM의 3d 전자와 RE의 5d 전자의 interband 전이에 관련된 oscillator의 강도에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. [33] TM의 3d band는 Fermi 준위에서 1-3 eV 범위에 존재하며 RE의 4f band는 약 8 eV 근처로 가시광선 영역의 레이저 광자의 에너지가 작으므로 Kerr 회전각은 주로 TM의 자화값에 의존하게 되는 것이다. Kerr 회전각 $\theta_K = K \times (M \cdot \kappa) = K M \kappa \cos \alpha$ 식에 의해 결정된다. 여기서 K는 Kerr 회전계수, M은 자화값, κ 는 wave vector의 크기(보통 박막면에 수직 한 방향이 된다.), 그리고 α 는 평균 자화용이축 방향의 분산각 (spin dispersion angle)이다. 따라서 θ_K 의 크기는 TM의 자화값 이외에 spin 분산각 α 에 좌우된다. 자화용이축과 κ 간의 각에 따라 θ_K 가 변화하므로 평균 spin 분산각 α 가 가장 작을 때 최대가 되며 또한 이때 자화용이축이 박막 수직 방향에 가장 접근하므로 수직자기이방성 에너지 K_u 도 최대가 된다. 따라서 각 조건에서 최대

수직자기이방성을 갖는 두께비에서 θ_K 도 최대치를 나타낸다. Fig. 6은 Tb이 12 Å일 때 두께비 변화에 따른 수직자기이방성 에너지, θ_K 및 평균 spin 분산각 α 의 변화를 나타낸 것이다. 앞에서 설명한 바와 같이 θ_K 는 α 와는 반비례, K_u 와는 비례관계를 보이고 있다. 최대 수직자기이방성 에너지 $6.52 \times 10^6\text{ erg/cc}$ 와 최소 스핀분산각 8.6° 를 갖는 두께비 1.55에서 θ_K 최대치 0.28° 를 얻었다.

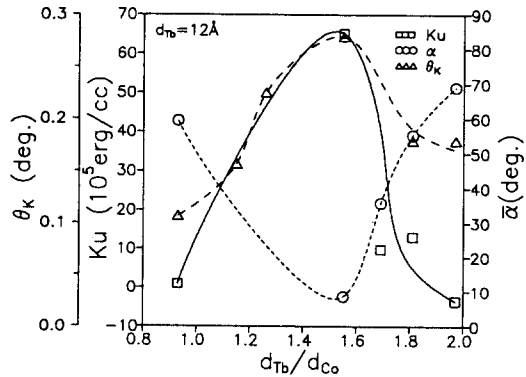


Fig. 6 Variations of perpendicular anisotropy energy constant K_u , Kerr rotation angle θ_K , and average spin dispersion angle α of Tb/Co with $d_{Tb} = 12\text{Å}$ as a function of thickness ratio.

시효특성

Fig. 7은 $d_{Tb}/d_{Co} = 12/7.9$ 시편을 a) 100, b) 200 및 c) 300 °C에서 시효시간에 따른 Hall 이력곡선의

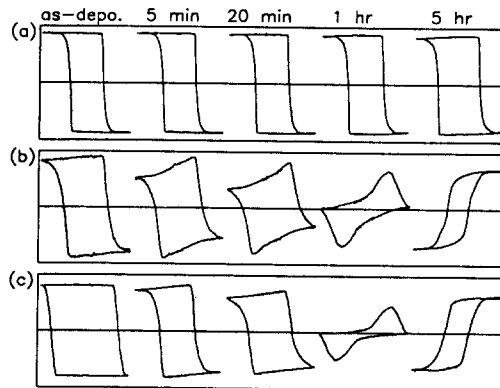


Fig. 7 Change of Hall hysteresis loops of Tb/Co as a function of aging temperature and time. ($d_{Tb}/d_{Co} = 12/7.868$) a) 100, b) 200, c) 300 °C.

변화를 보여준다. 100 °C에서는 Hall 이력곡선의 변화가 작으나 200 및 300 °C에서는 큰 변화를 보이고 있다. 200 및 300 °C에서는 5시간 경과 후에는 증착된 상태에서 RE-rich 이력곡선에서 TM-rich로 변하여 이력곡선의 극성(polarity)이 바뀌고 있다. 이러한 현상은 열처리가 진행됨에 따라 Tb이 선택적으로 산화가 되어 유효 Tb의 조성이 감소하기 때문에 나타난다. Fig. 8에 200 °C에서 1시간 시효하여 얻은 비정상 이력곡선 형성 원인을 분석

한 그림이다. Brillouin function을 이용한 계산에 의해 H_c 가 상대적으로 작은 TM-rich 이력곡선 (b)와 H_c 가 큰 RE-rich 이력곡선 (c)를 합성하면 이력곡선 (d)가 되며 이는 측정된 이력곡선 (a)와 잘 일치한다. 즉 이러한 비정상적인 이력곡선의 형태는 보상점 부근의 조성을 갖는 조성변조 다층박막에서 RE-rich 층과 TM-rich 층간의 보자력 차이가 커질 경우 두 층간에 magnetic coupling 때문에 나타나는 현상이다. 시효처리함에 따라 나타나는 것은 증착된 상태의 Tb층의 산화에 의해 Fig. 8(e)에서 보는바와 같이 유효 Tb양이 감소하여 보상조성 방향으로 근접하게 된다. 따라서 Tb층의 보자력은 증가되고 Co층의 조성은 큰 변화가 없으므로 두 층간의 보자력의 차이가 커지게 되어 (a)와 같은 형태의 이력곡선을 갖게 된다. 산화가 더욱 진전되면 Tb층의 조성은 보상점 이하로 이동하여 결국 이력곡선은 Co층의 이력곡선과 같아지게 된다.

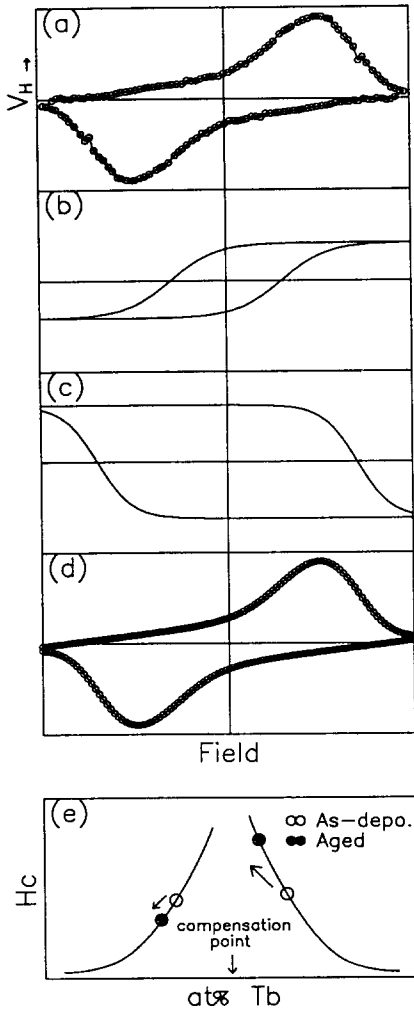


Fig. 8 a) Observed abnormal hysteresis loop, b) calculated hysteresis loop for Co-rich layer, c) calculated hysteresis loop for Tb-rich layer, d) calculated total hysteresis loop, e) schematic diagram for H_c variations as a function of composition.

IV. 결 론

동시 열 진공증착방법에 의해 체계적으로 구조적 조건에 따라 제작한 Tb/Co 조성변조 다층박막의 자기 및 자기광 성질에 관하여 연구하여 다음의 결론을 얻었다.

- 1) Tb의 두께가 4, 8, 12, 16 Å인 Tb/Co 다층박막의 수직자기이방성 범위는 두께비가 각각 1.41~1.66, 1.06~1.8, 0.93~1.81, 1.14~1.81로서 Tb의 두께가 12 Å일 때가 가장 큰 범위에서 수직자기이방성을 보였고, 최고 6.52×10^6 erg/cc의 수직자기이방성 에너지 값을 얻었다.
- 2) Tb의 두께가 12 Å에서 최대 수직자기이방성을 보이는 것은 Tb/Co 계면에서의 Tb-Co이종 원자쌍뿐만 아니라 Tb-Tb, Co-Co동종 원자쌍도 수직자기이방성에 기여하기 때문으로 생각된다.
- 3) Kerr 회전각(θ_K)은 수직자기이방성 에너지와 비례, 평균 스핀 분산각(α)과는 반비례하는 거동을 보였으며 Tb의 두께가 12 Å이고 두께비 1.55에서 Kerr 회전각 0.28° 를 얻었다.
- 4) 열처리시 나타나는 비정상적인 이력곡선은 Tb층의 우선적인 산화로 Tb의 유효조성이 감소하여 조성이 보상점 근처로 이동하게 되어 Co층과의 보자력 차이가 커져서 나타난다.

감사의 글

본 연구의 일부는 고려대학교 특별연구비에 의해 수행

되었으며 이에 사의를 표하는 바입니다.

참 고 문 헌

- [1] P. Chaudhari, J. J. Cuomo and R. J. Gambino, Appl. Phys. Lett., **22**, 337(1973).
- [2] R. C. Taylor, J. Appl. Phys., **47**, 1164(1976).
- [3] S. R. Lee, A. E. Miller, and H. A. Blackstead, J. Appl. Phys., **60**, 3982(1986). ; J. D. Chung, D. Y. Lee, and S. R. Lee, New Phys., **29**, 570(1989). ; J. D. Chung, S. Y. Hwang, D. Y. Lee, and S. R. Lee, New phys. **29**, 765(1989). ; J. D. Chung, S. Y. Hwang, S. H. Lee, and S. R. Lee, New Phys., **30**, 595(1990).
- [4] T. Chen and G. B. Charan, IEEE Trans. Magn., **MAG-16**, 1194(1980).
- [5] J. D. Chung, S. R. Lee, H. J. Chung, S. Y. Hwang, J. of Korean Inst. of Metals, **28**, 1002(1990).
- [6] F. J. A. M. Greidanus, W. F. Godelieb and P. M. L. O. Schoite, J. Appl. Phys., **63**, 3841(1988).
- [7] S. R. Lee and I. K. Kim, Korean J. Applied Physics, 3(4) 555(1990); J. D. Chung, S. Y. Hwang, H. J. Chung, and S. R. Lee, New Phys., **30**, 745(1990).
- [8] M. Takahasi, T. Niihara and N. Ohta, J. Appl. Phys., **64**, 262(1988).
- [9] N. Sato, Y. Aoki and S. Miyaoka, IEEE Trans. Magn., **MAG-20**, 1022(1984).
- [10] S. Yumoto, Y. Hidaka and O. Okada, J. Appl. Phys., **67**, 5730(1990).
- [11] S. Tsunashima, S. Masui, K. Kobayashi and S. Uchiyama, J. Appl. Phys., **53**, 8175(1982).
- [12] Y. Togami and R. Sato, Jap. J. Appl. Phys., **24**, 106(1985).
- [13] D. K. Hairston and M. H. Kryder, J. Appl. Phys., **63**, 3261(1988).
- [14] H. Takagi, S. Tsunashima, S. Uchiyama and T. Fujii, J. Appl. Phys., **50**, 1642(1979).
- [15] T. Tsunashima, H. Takagi, K. Kamegaki, T. Fujii and S. Uchiyama, IEEE Trans. Magn., **MAG-14**, 844(1978).
- [16] R. Sato, N. Saito and Y. Togami, Jpn. J. Appl. Phys., **24**, 106(1985).
- [17] T. Kusuda, S. Honda and M. Ohkoshi, J. Appl. Phys., **52**, 2298(1981).
- [18] S. Yasugi, S. Honda and M. Ohkoshi, J. Appl. Phys., **53**, 2338(1982).
- [19] C. T. Burilla, W. R. Bekebrede, M. Kesygian, and A. B. Smith, J. Appl. Phys., **49**, 1750(1978).
- [20] T. Katayama, M. Hirano, Y. Koizumi, and K. Kawanishi, IEEE Trans. Magn., **MAG-13**, 1603(1977).
- [21] H. Takagi, S. Tsunashima, and S. Uchiyama, J. Appl. Phys., **50**, 1642(1979).
- [22] S. H. Gill, M. Chen, and J. H. Judy, J. Appl. Phys., **49**, 1741(1978).
- [23] N. Sato, J. Appl. Phys., **59**, 2514(1986).
- [24] Z. S. Shan and D. J. Sellmyer, Phys. Rev. Lett., **63**, 449(1989).
- [25] 김상록, 이성래, 대한금속학회지, **29**, 839(1991).
- [26] H. Miyajima, K. Sato and T. Mijiguchi, J. Appl. Phys., **47**, 466(1976).
- [27] K. Okamoto, T. Shirakawa, S. Matsushita, and Y. Sakurai, IEEE Trans. Magn., **MAG-10**, 799(1974).
- [28] M. Mansuripur and M. F. Ruane, IEEE Trans. Magn., **MAG-22**, 33(1986).
- [29] N. Sato and K. Habu, J. App. Phys., **61**, 4287(1987).
- [30] N. Sato and K. Habu, and T. Oyama, IEEE Trans. Magn, **MAG-23**, 2614(1987).
- [31] S. Honda and M. Yoshiyama, Jpn. J. Appl. Phys., **27**, 1687(1988).
- [32] S. Honda and M. Yoshiyama, Jpn. J. Appl. Phys., **27**, 2073(1988).
- [33] T. Niihara, IEEE Trans. Magn. **MAG-22**, 1215(1986).

A Study on the Magnetic and Magneto-Optical Properties of Tb/Co Composition Modulated Multilayer Films

Suckji Hong, Sangrok Kim and Seong-Rae Lee

Division of Materials Science and Engineering University, Seoul 136-701

(Received 25 March 1996, in final form 17 July 1996)

The magnetic and magneto-optical properties of the Tb/Co multilayers as a function of the layer thickness and the ratio of Tb/Co thicknesses were studied. When the thickness of Tb layer was 12 Å, the maximum perpendicular anisotropy energy and the maximum thickness ratio which displays the perpendicular anisotropy were obtained. This result indicated that the Tb-Tb and Co-Co pairs as well as the Tb-Co pairs contribute to the perpendicular anisotropy. The Kerr rotation angle, θ_K was proportional to the perpendicular anisotropy energy and was inversely proportional to the average spin dispersion angle, α . The maximum θ_K of 0.28° was obtained in the film of 12 Å Tb and the thickness ratio of 1.55. The abnormal hysteresis loops were appeared during the aging treatment because the coercivity difference between the Co layer and the Tb layer was increased by the preferential oxidation of Tb.