

TbFe 스퍼터박막의 두께 및 조성분포 계산

Calculation of Thickness and Composition Profiles of Sputtered TbFe Thin Films

박종철* · 김순광*

(Jong-Chul Park · Soon-Gwang Kim)

요 약

스퍼터링시 타겟에서 튀어나오는 원자의 방출각도분포를 새로운 함수로 표현하고 이를 이용하여 박막의 두께와 조성분포를 예측하는 방법을 구하였다.

2원계 TbFe박막의 복합타겟 마그네트론 스퍼터에 의해 제작된 박막의 조성 및 두께해석에 본 모델을 적용한 결과, 스퍼터시 Tb는 overcosine, Fe는 undercosine 방출분포를 갖는다는 것이 밝혀졌으며 이를 이용하여 실용디스크의 대면적균일화 방안의 도출기반을 마련하게 되었다.

ABSTRACT

New emission profile model was proposed to describe the spatial distribution of ejected atoms from composite target during magnetron sputtering. On this basis, computer program was developed to calculate thickness and composition profiles for sputter-deposited films.

Emission profile functions for Tb and Fe obtained from the analysis of experimental data about sputtered TbFe films were overcosine and undercosine respectively, in contrast to cosine emission in case of evaporation. By the use of these functions, calculated composition profiles as well as thickness profiles in TbFe films could be well fitted to experimental data.

* 한국과학기술연구원

1. 서론

TbFe박막은 최근 고밀도기록기술로 각광을 받고 있는 광자기기록용매체로서 수직자기이방성과 보자력이 크고 큐리온도가 낮아 좋은 열자기기록특성을 갖는다.^{1,2)} 그러나 자기적 특성 및 레이저에 의한 기록특성 등이 박막의 조성 및 두께에 의해 민감하게 변화하므로^{3,4)} 대면적 디스크 제작시 두께·조성분포의 균일성제어는 고품질광자기디스크 실현에 필수적이다. 두께·조성 및 그 분포를 제어하려면 제반 스퍼터변수들과 스퍼터 원자분포 및 흐름간의 정량적 관계를 알고 있어야 한다. 특히 성막속도가 빠르고 치밀한 구조를 가져 내식성 및 자기적 특성이 우수한 박막을 얻는데 유리한 마그네트론 스퍼터링은 타겟의 선택적 침식이 큰 문제로서 이를 고려할 수 있어야 할 것이다. 따라서 다양한 스퍼터조건마다 이러한 관계를 모두 실험 데이터로서 얻을 수는 없는 일이므로 합리적인 모델 수립에 의하여 최소한의 실험 데이터를 이용하여 스퍼터변수와 스퍼터원자의 방출분포(emission profile)에 대한 정량적 관계를 수립하는 것이 바람직하다. 이러한 관점에서 본 연구는 TbFe박막을 복합타겟을 이용하여 마그네트론 스퍼터시 두께와 조성분포를 예측할 수 있는 실용모델을 만들고 Tb와 Fe의 방출분포를 예측하여 대면적박막 균일화 방안의 기반을 마련하고자 한다.

2. 실험방법

TbFe박막은 슬라이드글라스 기판상에 RF 마그네트론 스퍼터링으로 제조하였다. 진공조는 8×10^{-7} Torr이하까지 배기하고 Ar압력 1mTorr, RF투입전력 400w에서 10분간 스퍼

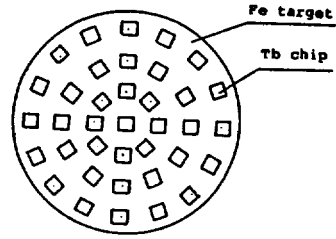


그림 1. TbFe복합 target구성도

Fig 1. TbFe composite target.

터하였다. 타겟은 그림1과 같이 150mm ϕ 의 Fe타겟상에 10mm \times 10mm의 Tb chip를 균일하게 배치한 복합타겟을 이용하였다. 기판은 타겟직상에서부터 140mm떨어진 곳까지 길게 배치하여 성막후 타겟직상에서부터 2cm간격으로 박막의 두께 및 조성을 측정하여 그 분포를 두께·조성분포예측 모델에 의한 계산치와 비교하였다. 기판-타겟간의 전극간거리는 142mm로 하였고 기판회전시는 타겟중심직상에서 140mm떨어진 곳을 회전축으로 하여 전극간거리 142mm에서 30 또는 60rpm의 속도로 회전하며 성막하였다.

박막두께는 DEKTAK II stylus형 박막두께 측정기를 사용하였으며 박막조성은 유도결합플라즈마(ICP) 분석법을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1 코사인 분포법칙 및 환상타겟가정에 의한 두께분포

진공증착시의 증착막의 두께예측에 사용하고 있는 코사인 분포법칙을 방전기체압력이 낮을 때의 스퍼터의 경우에 적용한다. 그림2와 같이 미소면적의 증발원에서 물질이 증발할 때 증발원과 평행한 평면기판에서의 박막 두께는 증발물질이 증발하여 기판에 도착시

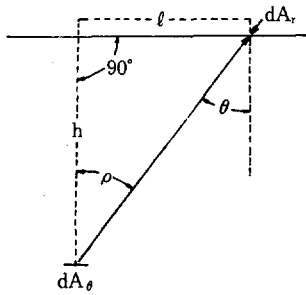


그림 2. 미소평면 source에서 평행평면 기판에의 증착

Fig 2. Deposition from a small area source onto a plane-parallel substrate.

까지 기체원자와의 충돌이 없다면 다음과 같이 주어진다.⁵⁾

$$d = \frac{1}{\rho} \frac{M_e}{\pi r^2} \cos \phi \cos \theta \quad (1)$$

여기서 ρ : 증발물질의 밀도

M_e : 증발물질의 총증량

r : 증발원으로부터의 거리

ϕ : 평면증발원의 법선과 증발원-기판을 잇는 선과 이루는 각

θ : 평면기판의 법선과 증발원-기판을 잇는 선과 이루는 각(증발원과 기판이 평행할 경우 $\theta = \phi$)

따라서 그림2에서 식(1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$d = \frac{1}{\rho} \frac{M_e}{\pi r^2} \left(\frac{h}{r}\right) \left(\frac{h}{r}\right) = \frac{M_e}{\pi \rho h^2} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{l}{h}\right)^2\right]^2} \quad (2)$$

원판타겟을 사용한 마그네트론 스퍼터의 경우 전극내부의 자석에 의한 자장의 영향때문에 전계와 자계가 직교하는 부분, 즉 타겟 중앙과 원주상 가장자리를 제외한 중앙의 환상부에 방전이 집중되어 이 부분이 현저하게

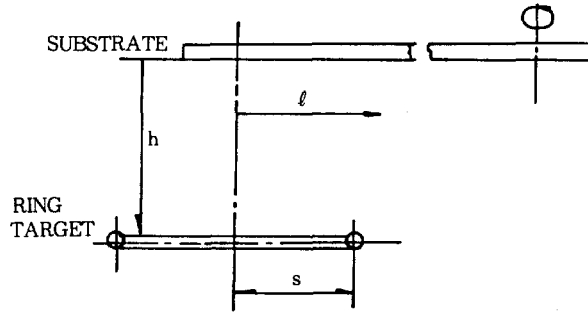


그림 3. 환상 Target

Fig 3. Geometry in ring target system.

스퍼터된다. 따라서 여기서는 환상타겟으로 가정하고 코사인분포법칙을 이용하여 그림3과 같이 타겟과 기판이 평행할 때 기판상에서 두께분포 및 타겟 중앙 직상에서의 두께는 식(2)를 이용하여 적분하면 다음과 같이 주어진다.

$$\left(\frac{d}{d_0}\right) = \left[1 + \left(\frac{s}{h}\right)^2\right]^2 \frac{1 + \left(\frac{l}{h}\right)^2 + \left(\frac{s}{h}\right)^2}{\left[\left[1 - \left(\frac{l}{h}\right)^2 + \left(\frac{s}{h}\right)^2\right]^2 + 4\left(\frac{l}{h}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (3)$$

$$d_0 = \frac{M_e}{\pi \rho h^2} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{s}{h}\right)^2\right]} \quad (4)$$

그림 4(a)는 방전집중부의 반경 $S=40\text{mm}$ 및 전극간거리 $h=142\text{mm}$ 일 때의 기판상에서의 박막두께분포로, 실험치와 식(3)에 의한 계산치를 도시한 것으로 잘 일치하고 있다. 기판을 회전시킬 경우는 경사입사 또는 회전에 의한 박막의 부착계수감소가 전혀 없다고 가정하고 회전속도에 관계없이 회전에 의해 변하는 l 값을 기하학적으로 산출하여 식(3)에 대입, 적분하여 기판회전축상에서의 박막두께

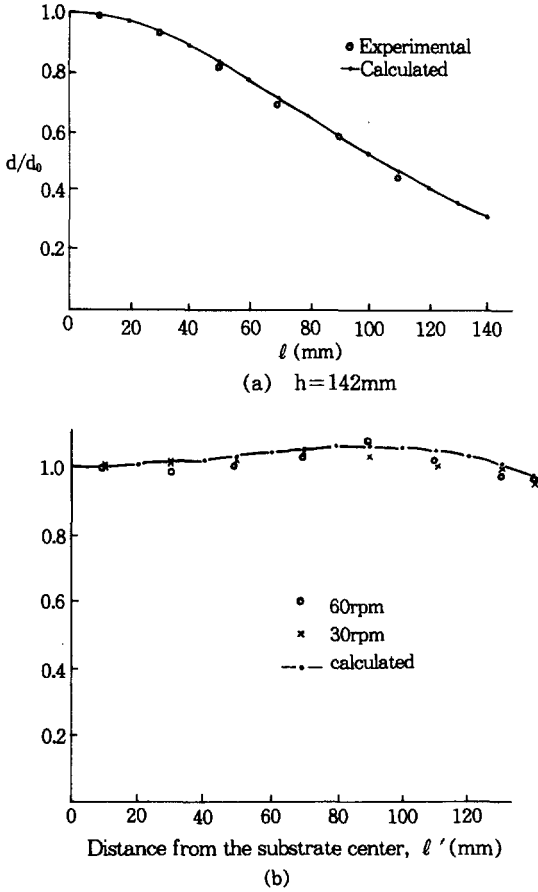


그림 4. 코사인분포법칙과 환상타겟 가정에 의한 두께분포의 계산치와 실험치의 비교:(a) 기판정지, 전극간거리 142mm (b)기판회전

Fig 4. Calculated and experimental thickness profiles assuming cosine emission profile and ring target for (a) static and (b) rotating sub-strate.

로 표준화하여 계산하면 그림 4(b)와 같이 실험치와 잘 일치한다. 이와 같이 TbFe합금박막의 두께분포의 계산치가 각 원소의 스퍼터 방출분포를 코사인법칙에 따른다고 가정하였을 때, 실험치와 잘 일치하고 있는 것은 두 원소의 코사인분포가정이 잘 맞거나 두 원소가 각각 서로 다른 off-cosine 분포를 가지나 총합적으로 볼 때 겉보기 결과가 코사인 분

포에 근접하는 두 가지 가능성을 예측해 볼 수 있다. TbFe복합 타겟구조에서 Fe타겟위에 Tb chip이 균일하게 배치되어 있다고 하면 전자의 경우는 기판정지시 기판상에서 반경방향으로의 조성의 변화는 없어야 하나 후자의 경우는 조성의 변화가 존재할 것이다. 따라서 다음 절에서는 타겟을 환상 타겟으로 가정하지 않고 복합타겟의 구조 및 타겟침식분포를 고려하여 스퍼터된 TbFe박막의 두께분포뿐만 아니라 조성분포까지를 예측하는 모델을 수립하여 실제 실험치와 비교, Tb 및 Fe의 복합타겟 스퍼터시의 방출분포를 예측하고자 한다.

3-2 마그네트론 타겟 침식분포의 영향

평판 마그네트론 스퍼터의 경우 타겟이 디스크형상이라 하더라도 전술한 바와 같이 자장의 영향때문에 반경방향으로의 침식정도가 다르다. 그림5는 스퍼터후, 측정된 Fe타겟의 반경방향으로의 침식분포이다. TbFe 복합타

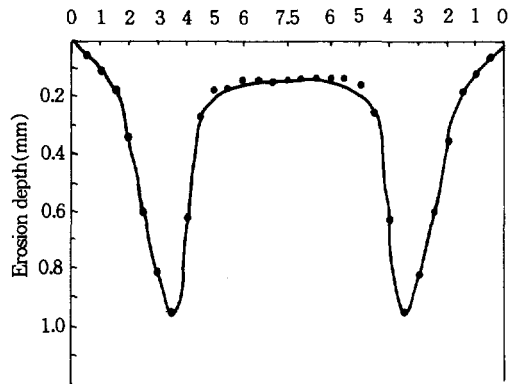


그림 5. 원판형 마그네트론 타겟의 반경방향의 침식분포

Fig 5. Erosion profile along the radius of circular planar magnetron target.

겟 구성시, Tb chip을 가능한 한 축대칭적 (axisymmetric)으로 배열하였을 때, 전체원판형타겟을 n개의 동심환상 source로 나누어 각 고리(ring)에서의 Tb chip이 차지하는 분율과 그림 5에서 측정된 각 고리에서의 가중치로부터 식(1)을 한 고리에 걸쳐 적분하여 한 고리에서 스퍼터된 박막상에서 Tb 및 Fe의 두께를 구한다. 각 원소를 각각 성막했을 경우의 두께의 합과 합금 박막이 이루어졌을 경우의 두께가 같다고 가정하면 각 고리에서 스퍼터되어 나온 Tb 및 Fe의 박막의 두께의 총합 및 그 상대적 비율로부터 두께 및 조성 분포를 구한다.

그림 6은 TbFe 복합타겟 면적이 18.1%Tb, $P_A=1\text{mTorr}$, 전극간거리 142mm에서 성막한 TbFe박막의 두께분포의 실험치 및 전절의 반경 40mm의 환상타겟 가정에 의해 구한 식(3)의 계산결과(Model I)와 타겟을 단일환상타겟이 아니고 실제 복합타겟의 Tb chip 배치 및 침식분포를 고려하고 타겟을 15개의 동심 고리로 나누어 그 각 고리에서의 두 원소는 모두 코사인 방출분포를 갖는다고 가정하여 적분·계산한 결과(Model II)이다. 두 모델에서 구한 두께분포의 계산치는 거의 같고 실험치와도 큰 편차없이 잘 일치하고 있으나 그림 7과 같이 박막의 조성분포는 실험치와 매우 다르다. 모델 I은 그 가정상 박막의 조성은 기판상 어느 곳에서도 타겟면적비와 같아야 하고, 모델 II에서 구한 조성의 계산치도 기판상에서 거의 일정하게 나와 타겟직상에서 멀어짐에 따라 Tb농도의 감소를 보이고 있는 실험치와는 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 이러한 조성 및 그 분포의 오차는 반경 방향에서의 chip배치의 분균일성에 의한 것이 아니라 Tb와 Fe가 모두 코사인 방출분포를

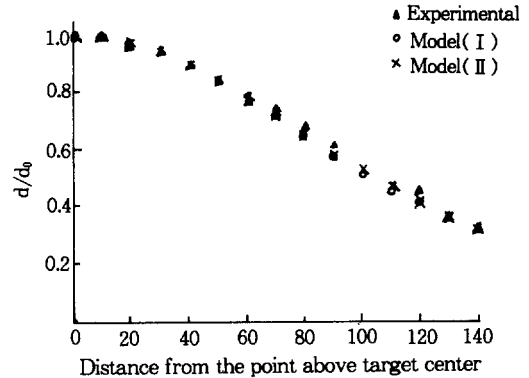


그림 6. 두께 분포의 실험치, 모델 I 및 모델 II에 의한 계산

Fig 6. Experimental and calculated thickness profiles using Model I and Model II.

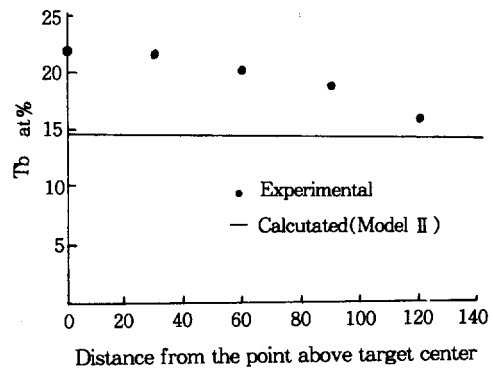


그림 7. 조성분포의 실험치 및 모델 II의 계산치

Fig 7. Experimental and calculated composition profiles using Model II.

한다는 가정에서 생기는 오차일 것이므로 실제 조성 및 그 분포의 실험치에 일치하려면 Tb와 Fe의 방출분포함수가 바뀌어야 한다.

3-3 방출분포함수를 고려한 스퍼터모델

식(1)에서 미소부분의 방출분포함수가 코사인 법칙이 아니고 다른 함수 $f(\theta)$ 로 표현된다 고 하면 식(1)은 다음과 같이 고쳐쓸 수 있다.

$$d = \frac{1}{\rho} \frac{M_e}{\pi r^2} f(\theta) \cos \theta \quad (5)$$

여기서 $f(\theta)$ 는 overcosine, cosine 및 undercosine 분포를 모두 표현할 수 있는 함수이어야 한다. 따라서 여기서는 undercosine 방출분포를 나타내는 함수로서 $\sin 2\theta$, overcosine을 나타내는 함수로서 $\cos^3\theta$ 를 채택하여 cosine함수와 조합하여 그 off-cosine 정도를 표현하고자 하였다. 그림 8은 타겟과 기판이 평행할 때 각각 극단적인 경우의 분포 함수, 즉, cosine법칙인 $\cos^2\theta$, undercosine법칙인 $\sin 2\theta \cos \theta$, overcosine 법칙인 $\cos^3\theta$ 를 그림으로 나타낸 것이다. 따라서 실제 각 원소의 분포함수는 다음과 같이 주어진다.

박막제작에 본 모델을 적용하려 하거나 chip이 큰 경우 및 전극간거리가 짧은 경우에도 적용하려면 타겟상에서의 동심고리를 한 요소로 하는 본 모델을 더욱 확장시켜 타겟상

$$f(\theta) = P_1 \cos \theta + P_2 \sin 2\theta + P_3 \cos^3 \theta \quad (6)$$

여기서 P_1, P_2, P_3 는 off-cosine 정도에 따라 주어지는 값이며 어떤 재질, 스퍼터압력 및 타겟투입전력에서 상수이다.

그림 7에서 Tb농도가 타겟직상에서 멀어짐에 따라 감소하는 실험결과로 보아 Tb는 overcosine분포, Fe는 undercosine 분포를 가져

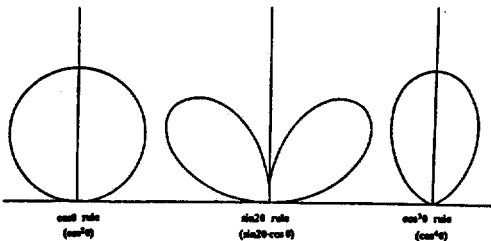


그림 8. $\cos^2\theta$, $\sin 2\theta$ 및 $\cos^3\theta$ 방출분포
Fig 8. Emission profiles for cosine($\cos^2\theta$), undercosine ($\sin 2\theta$) and overcosine($\cos^3\theta$) emission.

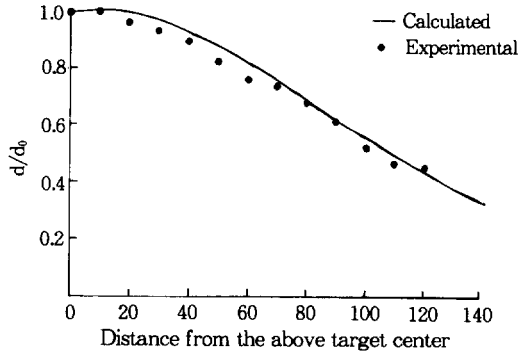


그림 9. Tb(overcosine), Fe(undercosine)의 방출분포를 고려한 계산치와 실험치의 두께분포 비교

Fig 9. Experimental and calculated thickness profiles using overcosine emission profile for Tb and undercosine for Fe.

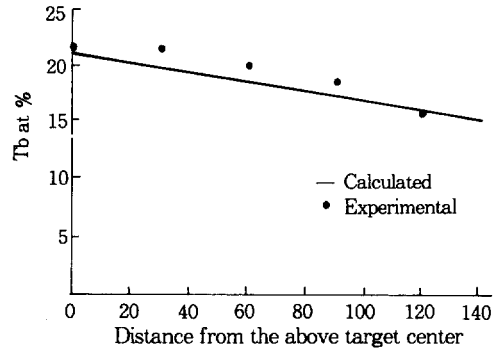


그림 10. Tb(overcosine), Fe(undercosine)의 방출분포를 고려한 계산치와 실험치의 조성분포 비교

Fig 10. Experimental and calculated composition profiles using overcosine emission profile for Tb and undercosine for Fe.

야 한다. 그림9 및 그림10은 Tb의 경우 식(6)에서 $P_1=1.53, P_2=0, P_3=0.96$ 의 overcosine 방출분포, Fe는 $P_1=1.53, P_2=0.21, P_3=0$ 의 undercosine분포(그림11)을 한다고 가정했을 때의 두께 및 조성의 분포를 실험치와 비교한 것이다. 두께 및 조성분포의 계산치는 앞에서의 경우보다 상당히 실험치에 근접하고

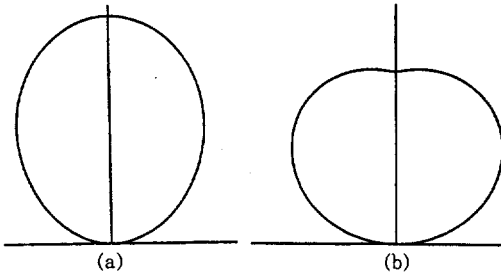


그림 11. (a) Tb의 overcosine 방출분포
(b) Fe의 undercosine 방출분포

Fig 11. (a) Overcosine emission profile for Tb
(b) Undercosine emission profile for Fe.

있다.

더욱 정확히 조성 및 두께분포의 계산치와 실험치를 일치시키려면 Tb와 Fe의 방출분포 함수의 계수 P_1 , P_2 , P_3 를 바꾸어 나가면서 계산치와 실험치를 비교, 반복계산시키면 가능하고 그 때의 분포함수가 실제 각 원소의 방출분포에 가장 가깝게 될 것이다.

본 모델은 타겟을 여러 개의 동심고리로나뉘 각 고리에서의 타겟침식분포를 고려하고 각 고리의 원주상으로는 chip이 축대칭적으로 배치되었다고 하여 실제 기판상에서의 두께 및 조성분포도 타겟 중앙 직상을 중심으로 원주상으로는 모두 같다고 가정하였지만 실제 복합타겟은 각 고리가 균일한 합금이 아니기 때문에 이상적인 축대칭을 이룰 수 없으나 chip의 크기가 타겟에 비해 그리 크지 않고 전극간거리가 아주 가깝지 않으면 어느정도 축대칭에 가깝게 복합타겟을 구성한 이상, 원주방향으로의 두께 및 조성분포는 거의 무시할 수 있다. 그러나 조성 및 두께의 허용오차가 아주 엄격한 소자 또는 디스크용에서의 미소면적만을 한 요소로 쪼개어 전 타겟에 걸쳐 적분하여야 할 것이다. 따라서 이러한 모델이 수립되면 복합타겟 구성원소

들의 방출분포를 구하는 데 사용될 뿐만 아니라 각 원소의 방출분포를 알 때 가장 균일한 박막의 두께 및 조성을 얻기 위한 최적 타겟 배치 및 전극간 거리, 또한 스퍼터 기체 압력, 타겟투입전력 등의 공정제어인자, 나아가서는 기관의 회전축의 위치 등 박막제조장치를 설계하는데 이용될 수 있을 것이다.

4. 결론

복합타겟 마그네트론 스퍼터에 의해 제작한 TbFe박막의 두께 및 조성분포의 실험치를 구하고 마그네트론타겟의 침식분포를 고려한 두께 및 조성 예측모델에 의한 계산치를 비교하여 Tb와 Fe의 방출각도분포를 구하였다. 일반적인 증착모델에서의 코사인분포와는 달리 Tb은 overcosine, Fe는 undercosine 방출분포를 가진다. 이러한 방출분포의 차이가 박막의 두께 및 조성분포변화의 한 요인이 되므로 실용 대면적디스크제작시는 이를 감안한 전극간거리의 조절, 기관회전, 복합타겟구성 등의 적절한 제어에 의하여 균일화방안이 도출될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 1) N.Imamura, Y.Mimura and T.Kobayashi
Jpn. J. Appl. Phys. **15**, 179(1976)
- 2) Y.Mimura and N.Imamura; *J. Appl. Phys.*,
28, 746(1976)
- 3) S.K.Lee and S.G.Kim; *IEEE Trans. Mag.*,
25, 4039(1989)
- 4) T.Nihara, S.Takayama and Y.Sugita; *IEEE Trans. Mag.*, **21**, 1638(1985)
- 5) R.Glang; *Handbook of Thin Film Technology*,
McGraw-Hill, 55.(1970).

(1990년 2월 17일 접수)