

## 반응 스퍼터링법으로 제조한 $Y_2O_3$ 박막의 잔류응력과 성장 방향성

최한메 · 최시경

한국과학기술원 재료공학과  
(1995년 5월 11일 접수)

### Residual Stress and Growth Orientation in $Y_2O_3$ Thin Films Deposited by Reactive Sputtering

Han-Mei Choi and Si-Kyung Choi

Dept. of Mater. Sci. and Eng., KAIST

(Received May 11, 1995)

#### 요 약

Y 타겟을 이용하여 산소와 아르곤의 혼합 기체 속에서 반응 스퍼터링으로  $Y_2O_3$  박막을 증착하였다.  $Y_2O_3$  박막에 존재하는 잔류응력을 x-선 회절을 이용한  $\sin^2\psi$  방법으로 측정하였고,  $Y_2O_3$  (400)면과 (222)면의 상대강도를 측정하여  $Y_2O_3$  박막의 성장 방향성을 조사하였다. 400°C의 기판온도에서 증착한 경우, 0.05 torr 이하의 낮은 작업 압력에서는 강한 압축응력과 (111)방향성, 0.10 torr 근방의 작업압력에서는 약한 압축응력과 (100)방향성, 0.20 torr 이상의 작업압력에서는 무응력상태와 무질서한 방향성을 나타냈다. 기판의 온도를 변화시켜 증착한 경우, 기판 온도가 감소함에 따라 압축응력이 증가하였다. 0.05 torr 이하의 낮은 작업압력에서 나타나는 (111)방향성 성장의 경우, 기판온도가 감소함에 따라 (111)방향성의 정도가 더욱 증가하였고, 0.10 torr 근방의 작업압력에서 나타나는 (100)방향성 성장의 경우, 기판온도가 감소함에 따라 (100)방향성의 정도가 더욱 증가하였다. 이러한 잔류응력과 성장 방향성과의 관계는 변형에너지와 표면에너지의 관계로 설명할 수 있었다.

#### ABSTRACT

$Y_2O_3$  thin films were deposited by reactive sputtering of Y target in Ar and  $O_2$  gas mixture. Residual stress was measured by  $\sin^2\psi$  method of x-ray diffraction (XRD) and growth orientation was examined by measuring the relative intensity of (400) plane and (222) plane of  $Y_2O_3$  films. In the case that  $Y_2O_3$  films were deposited at 400°C and at low working pressure below 0.05 torr the film had large compressive stress and (111) plane orientation. At working pressure of about 0.10 torr the film had small compressive stress and (100) orientation. Above working pressure of 0.20 torr, the films had nearly zero stress and random orientation. In the case that the (111) oriented film deposited at low working pressure, below 0.05 torr, as substrate temperature decreased, (111) orientation increased. In the case the film, with (100) orientation, deposited at working pressure of about 0.10 torr, (100) orientation increased with decreasing substrate temperature. These relationship of residual stress and growth orientation can be explained by the relationship of surface energy and strain energy.

**Key words:** Residual stress, Growth orientation, Surface energy, Strain energy

#### I. 서 론

기화법(evaporation)으로 박막이 증착될 때에, 박막의 성장 표면 근방은 매우 무질서한 상태에 있으며, 이러한 무질서한 상태는 통상적으로 부피의 증가를 가져온다. 박막이 성장함에 따라 나타나는 무질서한 상태에서 질서있는 상태로의 변화는 부피의 감소를 가져오고, 박막에

인장응력을 생성시킨다<sup>1)</sup>. 그러나 스퍼터링(sputtering)으로 증착한 박막은 기화법으로 증착한 박막과는 달리 압축응력 상태에 있다는 것이 보고되고 있으며, 이러한 압축응력은 shot-peening 효과와 비슷하게 고에너지 입자의 막에 충돌에 의해서 생긴다고 제안되고 있다<sup>2)</sup>. 이러한 압축응력의 크기는 박막에 충돌하는 원자의 에너지에 의해 영향을 받게 되고, 이 에너지는 증착조건에

따라 달라지게 된다. 따라서 스퍼터링으로 박막을 증착하는 경우, 잔류응력은 작업압력<sup>2-8)</sup>, M<sub>1</sub>/M<sub>2</sub> 비율(M<sub>1</sub>는 타겟물질의 원자량, M<sub>2</sub>는 작업기체의 원자량)<sup>9-12)</sup>, 기판에 인가한 바이어스<sup>4,5,6)</sup>, 플라즈마 전력 밀도<sup>6)</sup>, 방전 전압<sup>6,13)</sup>, 기판 온도<sup>11,15)</sup>, 증착 속도<sup>11,14)</sup> 등의 증착조건에 영향을 받는다.

이와 같은 스퍼터링의 작업조건에 따른 잔류응력의 변화는 박막의 결정 성장 방향과 밀접한 관계를 가지고 있다. AlN(HCP) 박막에서 응력 전이(stress transition)는 결정 성장 방향의 변화를 수반한다고 보고되고 있다<sup>9)</sup>. 즉, 압축응력을 가지는 박막의 경우에는 (002)방향성을 갖고, 인장응력을 가지는 경우에는 무질서(random)한 방향성을 갖는다. 낮은 작업 압력에서는 고에너지 입자가 시편 표면에 수직으로 충돌해 (002)방향성과 압축응력을 나타낸다. 반면에 작업압력이 높아지면, 원자와 작업기체와의 산란이 많아져, 낮은 에너지의 입자가 비스듬한 각도를 가지고 막에 충돌하게 된다. 따라서 인장응력과 무질서한 방향성을 나타낸다. Ag(FCC) 박막의 경우에는 낮은 작업압력에서 (111)방향성이 보고되고 있다<sup>4)</sup>. 앞의 AlN박막과 비슷하게 작업압력이 증가함에 따라 방향성은 사라진다. Ti(HCP) 박막의 경우에 낮은 작업압력에서 (002)방향성을 나타내나 기판에 바이어스를 걸어주어 압축응력이 커지는 경우에는 (002)방향성을 나타내지 않는다<sup>8)</sup>. TiN(cubic)을 DC 반응 스퍼터링으로 제조한 박막의 경우에 낮은 N<sub>2</sub> 분압의 경우에는 (200)방향성을 높은 N<sub>2</sub> 분압의 경우에는 강한 압축응력과 함께 (111)방향성을 나타낸다<sup>12)</sup>. LaB<sub>6</sub>(cubic) 박막의 경우에는 잔류응력과 성장 방향성의 관계를 변형에너지(strain energy)와 표면에너지(surface energy)로 설명하고 있다<sup>5)</sup>. MgO(cubic)의 경우에는 (200)방향성을 나타내는데 작업압력과 기판온도, 열처리 온도에 따라 그 정도가 달라짐을 보고하고 있다<sup>16)</sup>.

그러나 이러한 스퍼터링의 작업조건에 따른 잔류응력 및 박막의 성장 방향성의 변화에 대해서 많은 언급이 되고 있음에도 불구하고 잔류응력과 성장 방향성의 관계에 대해서는 명확한 설명이 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 입방정(cubic)이고<sup>17)</sup>, Y-O계에서 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 하나의 화합물만 존재하며, 화학량론적인 조성을 이루고 있는 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 계를 설정하여, 반응 스퍼터링으로 박막을 제조하는 경우에 나타나는 잔류응력과 성장 방향성의 관계에 대해 설명하고자 한다.

## 2. 실험방법

Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막을 99.9%의 순수한 Y 타겟을 이용하여 DC 마그네트론 스퍼터링 장치로 반응 스퍼터링법으로 증착하였다. 작업기체로 Ar과 O<sub>2</sub>의 혼합기체를 사용하였고, MFC(Mass Flow Controller)를 이용해 Ar과 O<sub>2</sub>의 유량을 각각 독립적으로 조절하였다. 터보 분자 펌프와 로터리 펌프로 구성된 진공 장치를 이용해 진공통내의 초기압력을 5×10<sup>-6</sup> torr로 유지하였다. 작업압력에 따른 잔류응력의 변화를 관찰하기 위해 기판온도를 400°C로, O<sub>2</sub>/Ar 유량비(flow ratio)를 0.033으로 일정하게 유지하고 작업압력을 0.03 torr부터 0.25 torr까지 변화시켰다. 기판온도에 따른 잔류응력의 변화를 관찰하기 위해 0.05 torr와 0.10 torr의 작업압력에서 기판온도를 각각 270~400°C, 200~400°C까지 변화시켰다. DC 전원 공급 장치를 이용해 타겟에 100W의 전력을 가하였다. Ni 기 초합금인 Inconel 600을 ¼ μm 다이아몬드 웨이스트까지 경면 연마한 후, 아세톤을 매질로 10분 이상 초음파 세척하여 기판으로 사용했다. 기판온도는 K-type 열전대를 이용해 측정되었다. 이동식 셔터가 장착되어 있어 전-스퍼터링(pre-sputtering)시 기판을 보호할 수 있도록 되어 있으며, 타겟 표면의 불순물을 제거하기 위해 10분 이상 전-스퍼터링 하였다.

X-선 회절(X-ray diffraction)을 이용한 sin<sup>2</sup>ψ 방법<sup>18,20)</sup>으로 막내의 잔류응력을 측정하였다. 40 kV, 100 mA로 생성된 단색(monochromated) Cu-Kα 선을 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (222)면에 입사하여 0.002°당 1초씩 스텝 스캔(step scan) 하였다.

박막의 성장 방향성의 변화는 (400)면과 (222)면의 상대강도를 측정하였으며, 다시 pole-figure를 이용하여 확인하였다. 박막의 성장 표면과 단면 미세구조는 SEM을 이용하여 조사되었다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 작업압력에 따른 고유응력(intrinsic stress)의 변화를 나타내고 있으며, 이 고유응력은 다음과 같이 구할 수 있다<sup>11)</sup>.

$$\sigma_{total} = \sigma_{intrinsic} + \sigma_{thermal} \quad (1)$$

여기서  $\sigma_{total}$ 은 전체 응력,  $\sigma_{intrinsic}$ 는 고유응력,  $\sigma_{thermal}$ 은 열응력을 나타낸다. X-선 회절 방법을 이용해 측정하는 잔류응력은 전체응력으로, 다음 (2)식에서 계산한 열응력을 빼주면 박막 제조시 생성된 고유응력을 구할 수 있다.

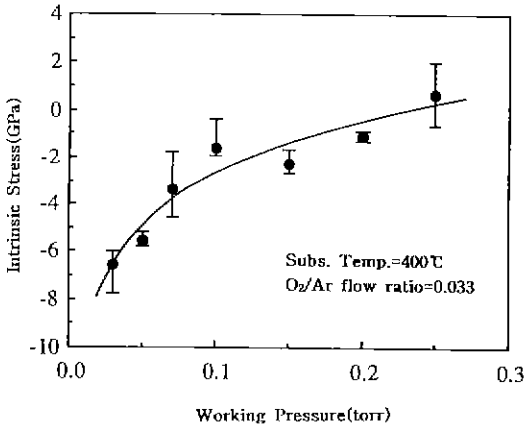


Fig. 1. Variation of intrinsic stress with working pressure.

$$\sigma_{\text{thermal}} = E_f (\alpha_s - \alpha_f) \Delta T / (1 - \nu_f) \quad (2)$$

여기서  $E_f$ 는 박막의 Young's modulus,  $\alpha_s$ ,  $\alpha_f$ 는 각각 기판과 박막의 열팽창계수,  $\Delta T$ 는 증착온도와 응력측정 시 온도차,  $\nu_f$ 는 Poisson's 비이다. 본 연구의 경우  $Y_2O_3$  박막의 물질 상수값으로 bulk의 상수값( $E_f = 150$  GPa,  $\nu_{Y2O3} = 0.298$ ,  $\alpha_{Y2O3} = 8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )<sup>21,22)</sup>을 이용했고, Inconel 600의 열팽창계수로는  $16 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 를 이용했으며<sup>21)</sup>, 계산한 열응력은  $-0.5$  GPa의 압축응력이었다. Fig. 1에서 보면, 낮은 작업압력에서는 강한 압축응력 상태인 것을 알 수 있고 작업압력이 증가함에 따라 압축응력의 정도가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 스퍼터링으로 증착한 박막의 응력상태 변화는 작업기체의 박막내 존재(entrapment)에 의한 효과라기 보다는 작업기체의 박막에의 충돌에 의한 원자 충돌 효과(atomic peening effect)로 설명하고 있다<sup>1-3)</sup>. 스퍼터링 중 막의 표면에 충돌하는 고에너지 입자(energetic particle)에 의해 막이 압축응력 상태에 있게 되는데, 작업압력이 증가하게 되면 고에너지 입자가 작업가스와 충돌하는 횟수가 늘어나 입자의 에너지가 줄어들게 되어 이 효과가 줄어들게 된다.

Fig. 2는 Fig. 1의 고유응력을 측정한 시편에서 측정된 (400)면과 (222)면의 상대강도의 비를 나타낸다.  $Y_2O_3$  표준 분말 시료의 (400)면과 (222)면의 상대강도값, 0.3 (JCPDS : 25-1200)과 비교해 볼 때, 0.05 torr 이하의 낮은 작업압력에서는 (111)방향성을 0.10 근방의 작업압력에서는 (100)방향성을 0.20 torr 이상의 높은 작업압력에서는 무질서한 방향성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 잔류응력이 작용하지 않는 경우에 박막은 표면 에너지(surface energy)를 최소화하기 위한 방향으로 성장을 하게

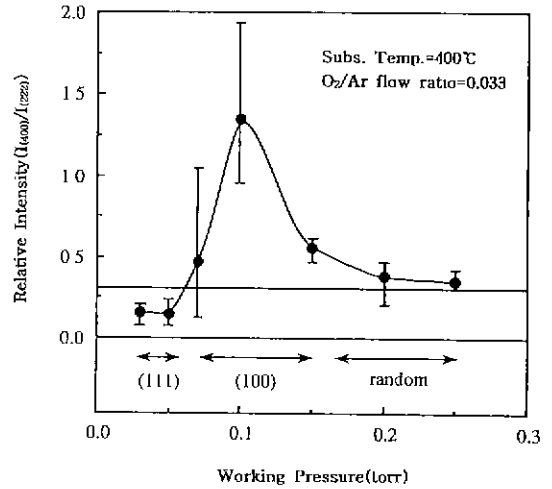


Fig. 2. Variation of growth orientation with working pressure.

되나, 잔류응력이 작용하는 경우 박막은 변형 에너지(strain energy)를 갖게 되고, 따라서 표면 에너지와 변형 에너지의 합을 최소화하기 위한 방향으로 성장하게 될 것이다<sup>23)</sup>. 따라서, 0.05 torr 이하의 낮은 작업압력에서 (111)방향성과 강한 압축응력이 나타나는 것은 (111)면이 (100)면에 비해 낮은 변형 에너지 면(low strain energy plane), 0.10 torr 부근의 작업압력에서 (100)방향성과 약한 압축응력이 나타나는 것은 (100)면이 (111)면에 비해 낮은 표면에너지 면(low surface energy plane)이기 때문인 것으로 생각할 수 있다.

이러한 성장 방향성의 변화를 구체적으로 확인하기 위해 pole-figure를 시도하였다. Fig. 3(a)는 0.05 torr 이하의 낮은 작업압력에서 발생하는 (111)면 방향성 성장을 (111)pole을 이용하여 관찰한 대표적인 결과이다. (111)pole들은 서로  $70.5^\circ$  만큼 기울어져 있기 때문에 중심 부분과  $70.5^\circ$  기울어진 부분에서 pole의 분포가 나타나게 된다. 여기서 pole들의 분포가 원형으로 되어 있는 것으로 보아 이것은 시편 표면 방향으로만 방향성을 가지고 성장했고, epitaxy 같은 형태는 아니라는 것을 알 수 있다. Fig. 3(b)는 0.10 torr 부근에서 발생하는 (100)면 방향성 성장을 (111)pole을 이용하여 관찰한 대표적인 결과이다. (100)pole과 (111)pole은  $54.7^\circ$  만큼 기울어져 있다. 여기서도 pole들의 분포가 원형으로 되어 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 작업압력에 따른 대표적인 미세구조의 변화를 나타낸다. Fig. 4(a)는 작업압력 0.05 torr에서 증착한 강한 압축응력과 (111) 성장 방향성을 나타내는 시편, (b)는

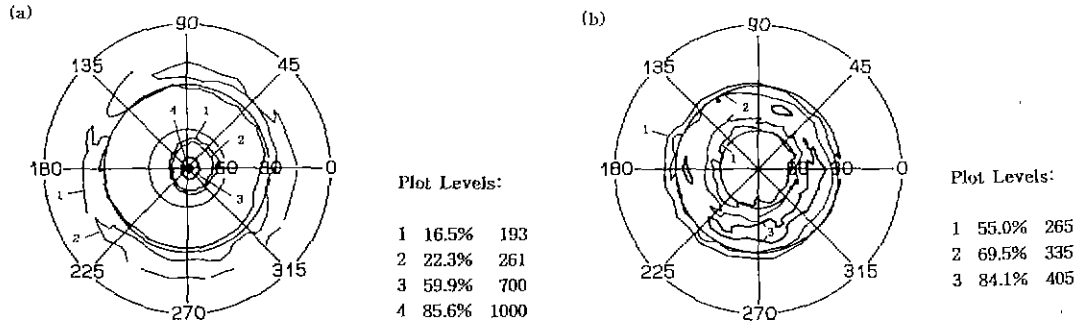


Fig. 3. Typical pole-figures of (111) poles for  $Y_2O_3$  films deposited at substrate temperature of  $400^\circ C$  and working pressures of (a) 0.05 torr and (b) 0.10 torr.

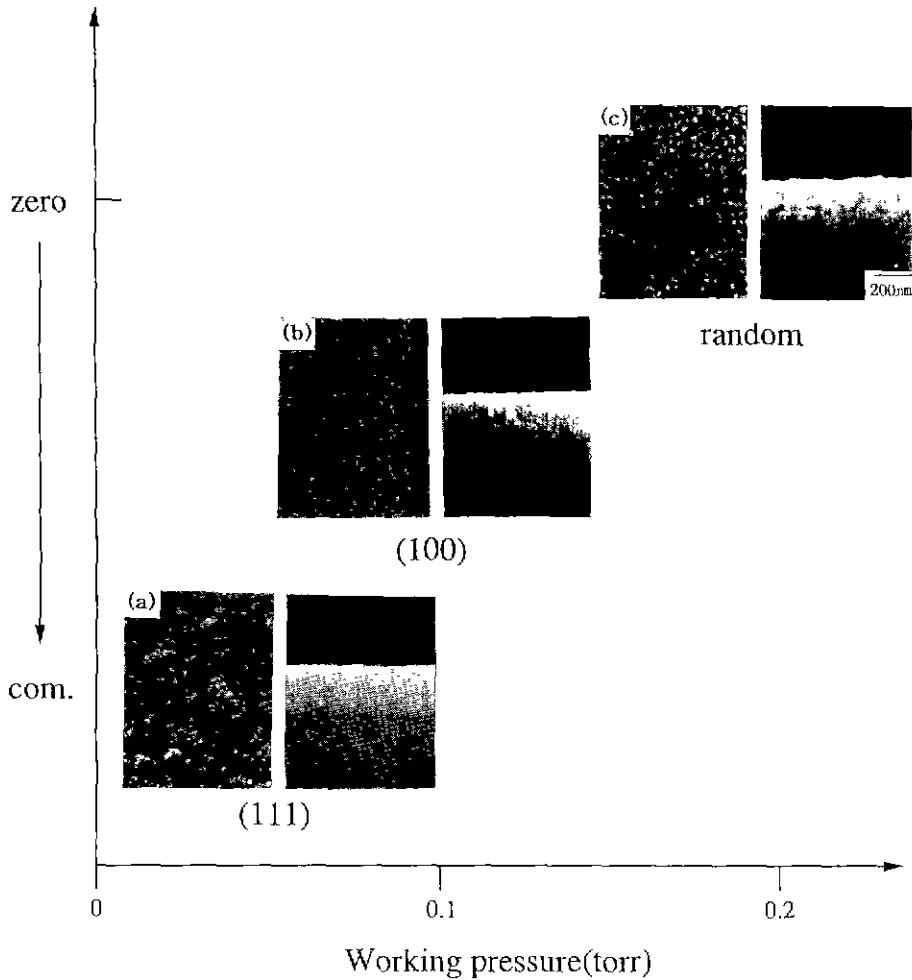


Fig. 4. Typical morphologies of surfaces and cross-sections for  $Y_2O_3$  films deposited at (a) 0.05 torr, (b) 0.10 torr and (c) 0.20 torr.

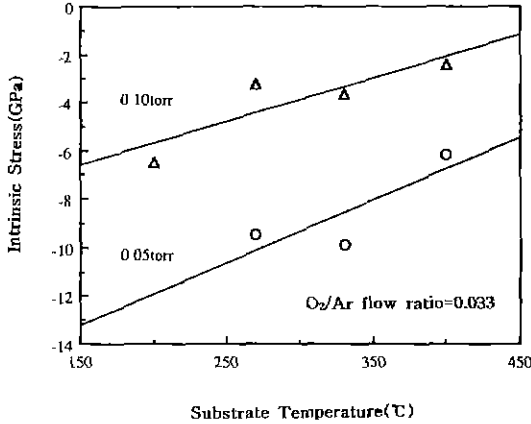


Fig. 5. Variations of intrinsic stresses with substrate temperature;  $\Delta$ : working pressure=0.10 torr,  $\circ$ : working pressure=0.05 torr.

작업압력 0.10 torr에서 증착한 약한 압축응력과 (100) 성장 방향성을 나타내는 시편, (c)는 작업압력 0.20 torr에서 증착한 거의 무응력상태와 무질서한 성장 방향성을 나타내는 시편의 미세구조이다. Fig. 4의 (a)를 보면 강한 압축응력으로 인하여 (111)방향성을 나타내면서 표면 형태는 울퉁불퉁한 것을 볼 수 있고, 주상조직 형태로 자라남을 알 수 있다. Fig. 4(b)를 보면 작업압력이 0.10 torr 되는 부근에서는 약한 압축응력으로 인하여 (100) 방향성을 나타내면서 표면 형태는 매끈한 것을 볼 수 있고, 주상조직 형태로 자라남을 알 수 있다. Fig. 4(c)의 작업압력이 큰 경우를 보면, 거의 무응력 상태를 나타내고, 무질서한 방향성을 나타내는데, 이때 표면 형태는 Fig. 4(a), (b)와는 다른 형태를 나타내고, 단면의 경우에도 주상조직 형태가 아님을 알 수 있다.  $Y_2O_3$ 의 결정구조를 보면  $\langle 100 \rangle$ 방향으로 Y과 O의 층이 번갈아 가며 쌓이는 구조이다<sup>20)</sup>. 따라서 (100)면 표면 형태가 (111)면 표면 형태에 비해 매끈하게 나타나는 것은 이러한 구조의 영향 때문이라고 예측된다.

다음은, Fig. 1에서 막중에 압축응력이 크게 발생하는 조건(0.05 torr)과 약한 압축응력이 발생하는 조건(0.10 torr)에서 기판의 온도 변화가 막중의 잔류응력과 성장 방향에 어떤 영향을 미치는 가를 조사하였다. 먼저 잔류응력의 변화를 Fig. 5에 나타낸다. 작업압력 0.05 torr, 기판온도 200°C인 조건에서는 결정성이 좋지 않아 제외시켰다. 두 경우 모두 기판의 온도가 낮아짐에 따라 압축응력의 경향이 커지는 것을 볼 수 있다. 스퍼터링으로 박막을 증착하는 경우 기판의 온도가 낮아짐에 따라

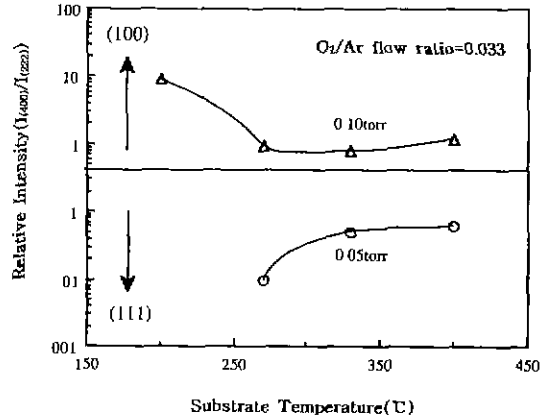


Fig. 6. Variations of growth orientations with substrate temperature;  $\Delta$ : working pressure=0.10 torr,  $\circ$ : working pressure=0.05 torr.

고유응력이 증가하는데, 이는 기판의 온도가 낮아짐에 따라 발생한 고유응력을 완화하는 효과가 줄어들기 때문이다<sup>11,15)</sup>.

Fig. 6은 작업압력이 0.05 torr, 0.10 torr일 때, 기판의 온도변화에 따른 성장 방향성 변화이다. 온도가 감소함에 따라 (111)방향성 성장인 경우에는 (111)방향성의 경향이 더욱 증가하고, (100)방향성 성장인 경우에는 (100)방향성의 경향이 더욱 증가하는 것을 볼 수 있다. 만일 (100)면이 표면에너지가 가장 낮은 면이라면 잔류응력의 증가와 함께 (100) 방향성이 감소하여야 한다. 그러나 증착시 기판온도가 감소함에 따라 압축응력과 방향성의 정도가 더욱 커지는 것으로 보아, (100)면이 표면에너지가 가장 낮은 면이 아니라는 것을 알 수 있다.

이와 같은 결과에 대해 좀 더 고찰해 보기 위해, 탄성 영역에서의 변형에너지는 단위 면적당 원자 개수가 많을수록 크고, 표면에너지는 단위 면적당 Y-O 결합이 끊어진 숫자가 많을수록 크다는 가정하에 구한 방향성 대 표면에너지, 변형에너지의 관계를 Table 1에 나타내었다. 변형에너지를 고려함에 있어서, 원자의 층에 따라 원자의 종류와 개수가 다르므로, 원자반경과 원자개수의 곱의 합이 큰 원자층(layer 2)으로 변형에너지를 고려하였다.  $Y^{3+}$ 의 원자반경은 0.106 nm이고,  $O^{2-}$ 의 원자반경은 0.132 nm이다. 표면에너지를 고려함에 있어서  $Y_2O_3$ 를 이온결합으로 생각하고 Y-O 결합이 Y-Y, O-O 결합에 비해 에너지가 크다고 가정하여 Y-Y, O-O 결합을 무시하였다. 앞의 실험결과와 같이, (111)면의 변형에너지 < (100)면의 변형에너지, (111)면의 표면에너지 > (100)면의

**Table 1.** The Relationships of Orientation vs. Strain Energy and Orientation vs. Surface Energy.

plane	layer 1		layer 2		$\sum$ radius $\times$ No. of atom	strain energy	No. of Y-O broken bond/ $\frac{1}{4}a^2$	surface energy
	atom	No./ $\frac{1}{4}a^2$	atom	No./ $\frac{1}{4}a^2$				
(100)	Y	2	O	3	$0.132 \times 3 = 0.396$	medium	6	medium
(111)	Y	2.3	O	2.6	$0.132 \times 2.6 = 0.343$	low	6.9	high
(110)	Y, O	1.4, 2.1	Y, O	1.4, 2.1	$0.106 \times 1.4 + 0.132 \times 2.1 = 0.426$	high	4.2	low

표면에너지의 관계가 성립함을 알 수 있고, (110)면과 같이 (100)면보다 표면에너지가 더 낮은 다른 면이 존재한다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

증착시 기판의 온도가 400°C인 경우, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 막의 성장 형태는 0.05 torr 이하의 낮은 작업압력에서는 강한 압축응력과 (111)방향성, 작업압력이 0.10 torr 부근일 때는 약한 압축응력과 (100)방향성, 작업압력이 0.20 torr보다 클 때는 무응력상태와 무질서한 방향성을 가진다. 따라서 (111)면의 변형에너지 < (100)면의 변형에너지, (111)면의 표면에너지 > (100)면의 표면에너지의 관계가 성립함을 알 수 있었다. 또한 증착시 기판온도가 낮을수록 압축응력과 방향성이 커지는 것으로 보아, (110)면과 같이 (100)면보다 표면에너지가 더 낮은 다른 면이 존재한다는 것을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원(92-23-00-07)으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

1. F.M. D'Heurle and J.M.E. Harper, "Note on the origin of intrinsic stresses in films deposited via evaporation and sputtering," *Thin Solid Films*, **171**, 81-92 (1989).
2. G.L. Huffman, D.E. Fahnline, R. Meissier and L.J. Piloni, "Stress dependence of reactively sputtered aluminum nitride thin films on sputtering parameters," *J. of Vac. Sci. Technol.*, **A7(3)**, 2252-2255, May/June (1989).
3. H. Windishmann, "Intrinsic stress in sputtered thin films," *J. of Vac. Sci. Technol.*, **A9(4)**, 2431-2435, Jul/Aug (1991).
4. N. Maréchal, E. Quesnel and Y. Pauleau, "Characterization of silver films deposited by radio frequency

- magnetron sputtering," *J. of Vac. Sci. Technol.*, **A12(3)**, 707-713, May/June (1994).
5. T. Nakano, S. Baba, A. Kobayashi, A. Kinbara, T. Kajiwara and K. Watanabe, "Structure modification of radio frequency sputtered LaB<sub>6</sub> thin films by internal stress," *J. of Vac. Sci. Technol.*, **A9(3)**, 547-549, May/June (1991).
6. T.J. Vink and B.A.D. vanZon, "Stress in sputtered Mo thin films: The effect of the discharge voltage," *J. of Vac. Sci. Technol.*, **A9(1)**, 124-127, Jan/Feb (1991).
7. J.A. Thornton and D.W. Hoffman, "Internal stresses in titanium, nickel, molybdenum, and tantalum films deposited by cylindrical magnetron sputtering," *J. of Vac. Sci. Technol.*, **14(1)**, 164-168, Jan/Feb (1977).
8. H. Ljungcrantz, L. Hultman, J.-E. Sundgren, S. Johansson, N. Kristensen, J.-Å. Schweitz and C.J. Shute, "Residual stresses and fracture properties of magnetron sputtered Ti films on Si microelements," *J. of Vac. Sci. Technol.*, **A11(3)**, 543-553, May/June (1993).
9. D.P. Smith, "Scattering of low-energy gas ions from metal surfaces," *J. Appl. Phys.*, **38(1)**, 340-347 (1967).
10. L.L. Maissel and R. Glang, "Handbook of Thin Film Technology," McGraw-Hill, New York (1970).
11. V. Orlinov and G. Sarov, "Mechanical stresses in D.C. reactively sputtered Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films," *Thin Solid Films*, **68**, 333-343 (1980).
12. F. Elstner, A. Ehrlich, H. Giegengack, H. Kupfer and F. Richter, "Structure and properties of titanium nitride thin films deposited at low temperatures using direct current magnetron sputtering," *J. of Vac. Sci. Technol.*, **A12(2)**, 476-483, Mar/Apr (1994).
13. R.W. Tustison, T.E. Varitimos, D.G. Montanari and J.M. Wahl, "Stress in Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films deposited by radio-frequency magnetron and ion beam sputtering," *J. of Vac. Sci. Technol.*, **A7(3)**, 2256-2260, May/June (1989).
14. D.W. Hoffman, "Stress and property control in sputtered metal films without substrate bias," *Thin Solid Films*, **107**, 353-358 (1983).
15. H. Windishmann, "Temperature dependence of intrinsic stress in Fe, Si, and AlN prepared by ion beam sputtering," *J. Vac. Sci. Technol.*, **A7(3)**, 2247-2251, May/June (1989).

16. R. Pinto, J.I. Poothra, S.C. Purandare, S.P. Pai, C.P. D'Souza, D. Kumar and M. Sharon, "Growth and microstructural study of radio frequency magnetron sputtered MgO films on silicon," *J. of Vac. Sci. Technol.*, **A9**(5), 2670-2674, Sep/Oct (1991).
17. M.B. Bever, "Encyclopedia of Materials Science and Engineering," Vol 7, 5509, Pergamon Press (1986).
18. T.B. Massalski, "Binary Alloy Phase Diagrams," 2nd ed., Vol 3, 2936.
19. I.C. Noyan and J.B. Cohen, "Residual Stress," Springer-Verlag, New York Inc. (1987).
20. B.D. Cullity, "Elements of X-ray Diffraction," Addison-Wesley (1977).
21. Y.S. Touloukian *et al.*, "Thermal expansion," Vol 12, 13, Perdue Research Foundation (1977).
22. "Engineering property data on selected ceramics," Metals and Ceramics Information Center (1976).
23. 김문집, 서일환, "X-선 회절 분석," 85, 반도 출판사 (1993).