

이온빔 보조 반응이온 마그네트론 스퍼터링으로 증착된 TiO₂ 박막의 특성

김성화[†] · 이재홍 · 황보창권

인하대학교 물리학과
(논문접수일 : 2002년 2월 20일)

Properties of TiO₂ thin films deposited by ion-beam assisted reactive magnetron sputtering

Sung-Hwa Kim[†], Jae-Hong Lee, and Chang Kwon Hwangbo

Dept. of Physics, Inha University, Incheon 402-751, Korea
(Received February 20, 2002)

요 약

낮은 산소 부분압과 긴 타깃-기판 거리에서 DC 반응이온 마그네트론 스퍼터링(reactive magnetron sputtering; RMS) 방법으로 TiO₂ 박막을 증착하였으며, 증착되는 박막에 end-Hall 이온 소스를 이용하여 아르곤 이온빔 보조 증착을 해 주었다. TiO₂ 박막의 광학적 특성은 분광광도계에서 측정된 투과율과 반사율 스펙트럼을 이용하여 분석하였고, 구조적 특성은 AFM과 XRD를 이용하여 분석하였다. 이온빔 보조 RMS 방법으로 증착된 TiO₂ 박막은 일반적인 RMS로 증착된 박막보다 조밀도가 높고, 흡수가 낮으며, 표면거칠기가 작았다. 본 연구에서는 이온빔 보조 RMS 방법이 유전체 광학박막 코팅에 적용될 수 있음을 보여준다.

Abstract

Titanium oxide thin films were deposited by DC reactive magnetron sputtering(RMS) with Ar ion-beam assistance using end-Hall ion source at low oxygen partial pressure and long target-to-substrate distance. The optical and structural properties of deposited films were investigated by the measurement of measured transmittance and reflectance, atomic force microscope(AFM), and X-ray diffraction(XRD). The results show that the Ar ion-beam assisted RMS for titanium oxide thin films induces the higher packing density, lower absorption, and smoother surface than the conventional RMS, suggesting that it can be employed in deposition of optical dielectric coatings.

1. 서 론

마그네트론 스퍼터링을 이용하여 금속 박막을 증착할 경우, 방전 가스로 사용되는 아르곤 가스 이온들은 음전압이 인가된 금속 타깃에 충돌하여 금속 원자나 분자들을 스퍼터시킨다. 초기에, 타깃에서 스퍼터된 금속 원자는 수 10 eV의 운동에너지를

가지며 타깃의 반대쪽에 위치한 기판 위에 증착된다 [1]. 그러나 금속 원자는 1~100 mTorr의 압력을 갖는 방전영역을 통과하면서 아르곤 이온들과의 충돌에 의해 진행 방향이 바뀌고 운동에너지를 잃게 된다 [2]. 한편 금속 산화 박막을 증착할 경우, 반응 가스인 산소는 아르곤 가스와 혼합되어 주입되거나 기판에 가깝게 위치시킨 별도의 주입구를 통해 진

[†] E-mail : joke100@empal.com

공챔버 내에 주입된다. 반응이온 마그네트론 스퍼터링(reactive magnetron sputtering; RMS)에서 금속과 산소의 반응은 기판에서만 아니라 타깃 쪽에서도 일어나서 타깃 표면 위에 절연성 산화층을 형성하게 된다. 그로 인해 타깃 표면 위에서 미세한 아크가 발생되고 타깃이 산화(poisoning)되며, 양극(기판과 챔버벽)이 산화층으로 덮여지게 되는 양극 소멸 현상 등이 일어난다 [3]. 이러한 문제점을 줄이기 위해서 타깃과 기판의 격리, 펄스형태의 가스 주입, 타깃-기판 거리의 증가, 펌핑속력 증가 등의 기술들이 적용되고 있다 [4-7]. 특히, 양극 소멸 현상을 해결하기 위해서 최근에는 중간(media) 주파수 이중 마그네트론 스퍼터링과 펄스형 DC 마그네트론 스퍼터링이 많이 사용된다 [7-10].

일반적으로 이온빔 보조 증착(ion-beam assisted deposition; IBAD)은 열저항 소스나 전자빔 소스를 사용하는 증발 증착법에서 제작되는 광학박막의 특성을 개선시키기 위해 적용되고 있다 [11-13]. IBAD로 증착하는 동안, 이온 소스에서 방출되는 수 백 eV의 운동에너지를 갖는 아르곤이나 산소 이온들이 기판 위에 성장하는 박막과 충돌하여 증착입자에 이온 운동량을 전달하게 되어, 기판 위 증착입자의 이동도를 증가시키게 된다. 이러한 IBAD는 기판과의 접착력, 조밀도, 굴절률, 박막의 밀도 등을 개선시켜 금속 산화 박막의 광학적 특성을 향상시키는 것으로 보고되었다 [11,14].

최근 IBAD 기술은 RMS 증착에 적용되어 이온빔 스퍼터링(ion-beam sputtering; IBS) 방법보다 높은 증착률과 대면적화가 용이하며, 광학 코팅의 손실을 감소시키며, 또한 조밀도가 크고 외부환경에 강한 광학박막을 제작할 수 있다는 장점을 이용하여 광통신에 사용되는 협대역 필터의 열적 안정성을 향상시키기 위한 방법으로 응용되고 있다 [15,16].

본 연구에서는 높은 에너지의 금속 입자를 생성시키는 RMS의 장점과 이온 소스에서 방출되는 아르곤 가스 이온들을 증착되는 박막에 충돌시켜 금속 산화 박막의 특성을 향상시키는 IBAD의 장점을 결합하여 이온빔 보조 반응이온 마그네트론 스퍼터링(ion-beam assisted reactive magnetron sputtering; IARMS) 장비를 구성하였다. 사용된 IARMS는 두 가지 관점에서 적용되었다. 첫째, 산소 반응 가스에 의한 타

깃의 산화를 방지하기 위해서 금속 원자와 산소의 반응이 일어나는 기판 영역을 금속이 스퍼터되는 타깃 영역과 분리시켰다. 이를 위해 타깃-기판 거리를 증가시키고 반응가스를 기판근처에 주입시켜 주었다. 둘째, 기판 영역과 타깃 영역의 진공도 차이를 크게 해주기 위해 펌핑속력이 빠른 고진공 펌프를 사용하였다. 즉 타깃 영역은 스퍼터링이 일어날 수 있도록 수 mTorr의 압력을 유지시키고, 기판 영역은 마그네트론에서 발생하는 미세입자에 의한 박막의 손상을 방지하기 위해 10^{-4} Torr 정도의 고진공을 유지하도록 하였다.

본 연구에서는 일반적인 마그네트론 스퍼터링이 행해지는 압력 영역보다 낮은 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ Torr의 압력 영역에서 광학 코팅용 TiO_2 박막을 증착하였다. 또한 이온빔 보조를 위해 end-Hall 이온 소스에서 아르곤 이온빔을 방출시켜 증착되는 박막에 조사해 주었다. TiO_2 박막은 광학 다층 코팅에서 저굴절률 물질인 SiO_2 박막과 대응되는 고굴절률 물질로 널리 사용되는데, $0.4 \sim 3 \mu\text{m}$ 의 파장영역에서 투과율이 높고, 내마모성이 좋으며, 화학물질에 대한 안정성이 좋다. IARMS로 증착된 TiO_2 박막의 광학적, 구조적 특성을 알아보았으며, 일반적인 RMS로 증착된 TiO_2 박막의 특성과 비교하였다.

2. 실험 방법

그림 1은 본 연구에서 사용된 IARMS 장비를 보여주고 있다. 진공챔버($\varnothing=500 \text{ mm}$, $H=700 \text{ mm}$)에 회전 펌프와 크라이오 펌프가 부착되어 있으며, 금속 증착을 위한 원통형 평판 마그네트론과 이온빔 보조를 위한 end-Hall 이온 소스로 구성되어 있다. 진공챔버의 진공도는 열전대 게이지와 이온 게이지를 이용하여 측정하였다. 마그네트론과 end-Hall 이온 소스는 기판 쪽으로 향하도록 설치하였다. 기판은 $25 \times 50 \text{ mm}^2$ 크기의 유리와 $25 \times 25 \text{ mm}^2$ 크기의 <100> 실리콘 웨이퍼를 이용하였다. 타깃-기판 거리(target-to-substrate distance; TSD)는 350 mm이고 이온 소스와 기판사이의 거리는 400 mm이다.

TiO_2 박막은 TSD=350 mm에서 아르곤 이온빔 보조를 하지 않은 경우와 이온빔 보조를 한 경우에 대해서 RMS로 증착하였고, 또한 TSD=150 mm에서 일반적인 RMS로 증착하였다.

이온빔 보조 반응이온 마그네트론 스퍼터링으로 증착된 TiO₂ 박막의 특성

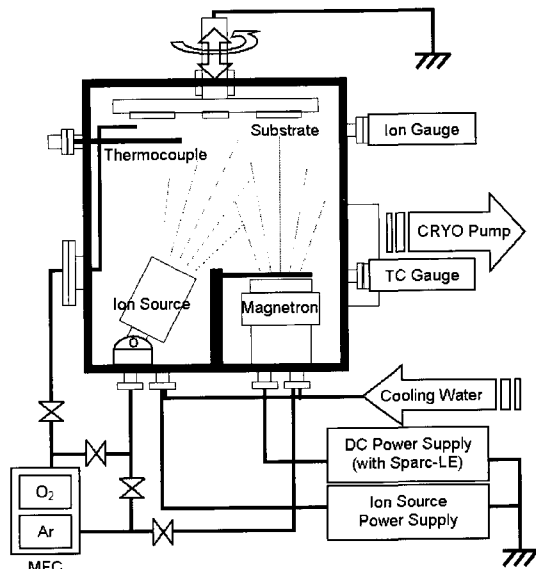


그림 1. 이온빔 보조 DC 반응이온 마그네트론 스퍼터링 장비의 모식도.

Ti(titanium) 타깃(99.995% 순도, $\phi=100$ mm, $t=6.4$ mm)이 장착된 마그네트론은 Sparc-LE와 연결되어 400 W의 일정한 DC 전력에서 작동시켰으며, 기판은 접지시켰다. 이때 사용된 펄스의 주파수는 50 kHz이고, 양전압이 인가되는 펄스 시간은 5 μ sec이며, 양전압의 크기는 음전압의 15%로 설정하였다. 방전 gas와 반응 gas는 각각 순수한 아르곤(99.99% 순도)과 산소(99.995% 순도) gas를 사용하였

으며, gas 주입량은 각각의 MFC를 통해 유지시켰다. 증착하기 전의 초기 진공챔버 압력은 5.0×10^6 Torr였고, 마그네트론의 타깃 주위에서 주입되는 아르곤 gas의 압력은 8.0×10^4 Torr였다. 기판 근처로 주입되는 산소 반응 gas의 부분압은 $0.83 \sim 4.4 \times 10^4$ Torr의 영역에서 변화시켰다.

증착되는 TiO₂ 박막의 이온빔 보조의 영향을 알아보기 위해 end-Hall 이온 소스의 양극 전류는 텅스텐 필라멘트 전류를 조절하여 0.5~1.1 A의 범위에서 변화시켰다. 양극 전압은 50 V로 유지하였는데, 양극 전압이 100 V이상인 경우는 아르곤 이온빔이 오히려 증착되는 박막의 표면을 스퍼터링시키는 역효과를 주었다. End-Hall 이온 소스에서 방출되는 이온빔은 43°의 발산각을 가진다. 이온 소스의 아르곤 gas는 마그네트론 스퍼터링 조건에 대한 영향을 최소화하기 위해 2 sccm을 주입하였다. 진공챔버의 전체 압력은 이온빔 보조를 하지 않은 경우에는 $8.3 \sim 12 \times 10^4$ Torr였고, 이온빔 보조를 한 경우에는 9.4×10^4 Torr였다.

기판 근처의 챔버 온도는 이온빔 보조를 하지 않았을 때는 70~150°C였고 이온빔 보조를 해 준 경우에는 이온 소스의 텅스텐 필라멘트로부터 방출되는 열로 인해 170°C까지 증가하였다. 증착하기 전에, 타깃 표면의 산화층을 제거하기 위해 5~10 분간 아르곤 gas 분위기에서 예비 스퍼터링을 충분히 해 주었다. 예비 스퍼터링을 하는 동안 타깃과

표 1. 증착 조건.

	Unit	Conventional RMS ^{*)}	IARMS ^{**)}
Base pressure	Torr	5.0×10^6	
Sputter pressure	Torr	8.0×10^4	
Sputter DC power(W_{DC})	W	400	
Film Thickness	nm	180 ± 20	
Target-to-substrate distance(TSD)	mm	150 / 350	350
Working pressure	Torr	$8.3 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^3$	9.4×10^4
Oxygen partial pressure(P_{O_2})	Torr	$8.3 \times 10^5 \sim 4.4 \times 10^4$	8.3×10^5
Anode voltage(V_A)	V	—	50
Anode current(I_A)	A	—	0.5~1.1
Substrate temperature	°C	Up to 150/100	Up to 170

*) RMS : reactive magnetron sputtering

***) IARMS : ion-beam assisted reactive magnetron sputtering

기판을 격리시키기 위해 셔터를 사용하였다. 본 연구에서의 증착 조건들을 표 1에 정리하였다.

증착된 TiO₂ 박막의 광학 스펙트럼은 분광광도계를 이용하여 300~2000 nm 영역을 측정하였다. 박막의 광학상수(굴절률과 소멸계수)는 투과율과 반사율을 이용하여 흡수가 적은 박막에 적용되는 포락선 방법으로 결정하였다 [17]. 박막의 조밀도는 진공-공기 스펙트럼 이동(vacuum-to-air spectral shift) 정도를 측정하여 결정하였다 [18,19]. 또한 표면 거칠기는 AFM을 이용하여 5×5 μm²의 스캔 영역에 대해서 측정하였으며, 증착된 박막의 결정구조는 CuK α 방사를 사용하여 θ=1.5°의 입사각도 모드에서 XRD를 이용하여 분석하였다.

3. 실험 결과 및 논의

3.1 히스테르시스 거동

TiO₂ 박막의 증착에서 최적의 산소 가스 주입량을 조사하기 위해, 반응이온 스퍼터링 과정의 비선형 현상인 산소 가스 주입량 변화에 따라 타깃에 인가되는 DC 스퍼터링 전압의 히스테르시스 거동을 측정하였다. 이 현상은 순수 금속 물질과 타깃 표면 위에 형성된 산화층 물질들의 2차 전자 방출 정도가 다르기 때문에 발생한다. 산소 가스 주입량에 의존하는 히스테르시스 곡선에서는 금속 모드와 산화 모드(또는 poisoned 모드)의 두 영역이 존재하며, 이 두 모드가 중첩되는 영역은 불안정한 구간으로 전이 영역이다 [7].

그림 2는 TSD=350 mm에서 히스테르시스 곡선의 DC 전력(W_{DC})에 대한 의존성을 보여주고 있다. 까만색 점(●)은 산소 가스 주입량(Q_{O₂})이 증가할 때이고 흰색 점(○)은 Q_{O₂}가 감소할 때이다. DC 전력이 증가함에 따라 히스테르시스 곡선의 DC 스퍼터링 전압(V_{DC})이 증가되고, 전이 영역의 위치가 오른쪽으로 이동하며 그 폭이 증가한다. 이것은 V_{DC}의 증가가 스퍼터링 방전 내의 아르곤 가스 이온들의 이온에너지를 증가시켜 산소 반응 가스가 타깃에 흡착되는 영역을 줄이기 때문이다. 이로 인해, 타깃에서의 아르곤 이온 전류 밀도가 증가하여 박막의 증착률이 증가하게 된다 [20]. 그림 2(a)에서

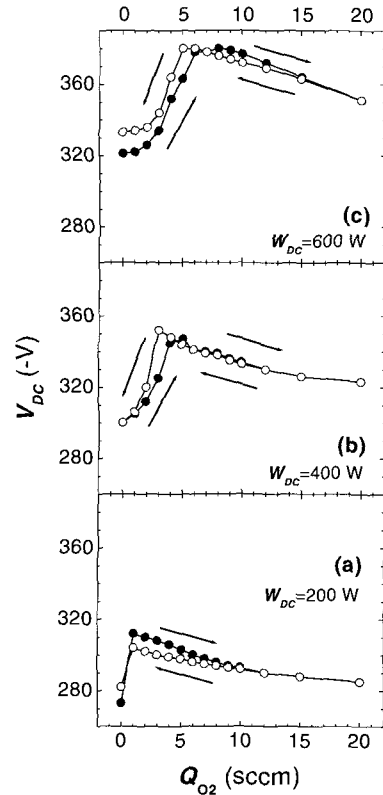


그림 2. TSD=350 mm에서 히스테르시스 곡선의 DC 전력(W_{DC})에 대한 의존성. (a) W_{DC}=200 W, (b) 400 W, (c) 600 W. 까만색 점(●)은 산소 가스 주입량(Q_{O₂})을 증가시킬 때이고 흰색 점(○)은 Q_{O₂}를 감소시킬 때이다.

DC 전력이 W_{DC}=200 W인 경우는 금속 모드 영역이 좁고, 그림 2(c)에서 W_{DC}=600 W일 때는 두 모드의 영역 구분이 정확하지 않다. 이에 비해 그림 2(b)에서는 W_{DC}=400 W일 경우 두 모드의 영역을 볼 수 있었으며, 본 실험에서는 마그네트론 스퍼터링에 인가되는 DC 전력을 W_{DC}=400 W로 결정하였다.

그림 3은 마그네트론의 DC 전력이 W_{DC}=400 W일 때, 산소 가스 주입량(Q_{O₂})의 변화에 따라 마그네트론에 인가되는 DC 스퍼터링 전압(V_{DC})의 변화를 보여주고 있다. 그림 3(a)와 3(b)는 TSD=150 mm와 350 mm에서 RMS인 경우이고, 그림 3(c)는 TSD=350 mm에서 IARMS인 경우이다. IARMS에서 end-Hall 이온 소스의 양극 전압은 V_k=50 V이다. 산소 가스 주입량이 Q_{O₂}=5.0 sccm까지 증가할 때

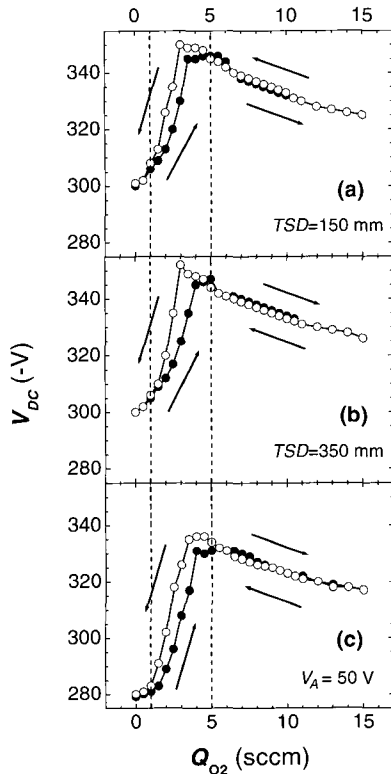


그림 3. 산소 가스 주입량 (Q_{O_2})에 따른 DC 스퍼터링 전압 (V_{DC})의 거동. (a) $TSD=150$ mm와 (b) 350 mm에서 RMS인 경우이고, (c) $TSD=350$ mm에서 IARMS인 경우이다. 히스테르시스 곡선에서 $Q_{O_2}=1.0\sim 5.0$ sccm의 구간(점선)은 전이영역을 나타낸다.

DC 스퍼터링 전압은 급격히 증가하고, 5.0 sccm 이상에서 서서히 감소한다. 반면에, 산소 가스 주입량을 감소시킬 때, DC 스퍼터링 전압은 $Q_{O_2}=1.0\sim 5.0$ sccm의 구간에서 동일한 경로를 따르지 않는 히스테르시스 곡선을 보인다. $Q_{O_2}=5.0$ sccm이상의 영역은 타겟 표면이 서서히 산소 반응 가스에 의해 산화되어 가는 산화 모드 영역이고, DC 전류는 타겟 표면 위에 형성된 산화층에서 방출되는 2차 전자로 인해 증가한다. 산화 모드 영역에서 증착된 TiO₂ 박막은 Ti 금속 원자와 산소가 충분히 결합을 하기 때문에 투명하지만 증착률은 아주 낮다. 반면에 $Q_{O_2}=1.0$ sccm 이하에서는 금속 모드 영역으로 유리 기판 위에 증착된 박막은 진한 갈색이고 증착률은 높았다. $Q_{O_2}=$

1.0~5.0 sccm이 전이영역으로 불안정한 구간이다. 본 연구에서는 투명하면서 증착률이 높고 흡수가 낮은 TiO₂ 박막을 증착하기 위해 산소 가스 주입량을 $Q_{O_2}=3.0$ sccm으로 선택하였다.

그림 3(a)에서 $TSD=150$ mm일 경우 DC 스퍼터링 전압은 그림 3(b)에서 보여주는 $TSD=350$ mm일 때와 동일한 값을 갖는다. 그러나 그림 3(c)에서 보여주는 것처럼, IARMS에서 DC 스퍼터링 전압은 이온빔 보조를 하지 않은 경우보다 약간 낮은 값을 가진다. 이것은 동일한 DC 전력과 산소 가스 주입량에서 타겟에 흐르는 DC 스퍼터링 전류가 크다는 것을 의미한다. 또한 그림 4에서 보여주는 것처럼, $W_{DC}=400$ W, $P_{O_2}=8.3\times 10^5$ Torr, 그리고 $V_A=50$ V 조건 하에서, 이온 소스의 양극 전류(I_A)를 증가시키면 마그네트론의 DC 스퍼터링 전압(V_{DC})이 감소한다. 즉, DC 스퍼터링 전류가 증가되어 마그네트론의 스퍼터링 수율을 증가시키고 박막의 증착률을 증가시키게 된다.

마그네트론의 타겟 표면 근처에 hollow cathode를 놓았을 때, hollow cathode에서 방출되는 전자들은 스퍼터링 방전 내에 있는 아르곤 가스의 이온화를 촉진시켜 낮은 압력에서 마그네트론 스퍼터링이 작동될 수 있도록 해 준다 [21-23]. End-Hall 이온 소스를 부가한 마그네트론 스퍼터링 증착은 이온 소스에서 방출되는 열전자와 아르곤 이온들의 일부분이 스퍼터링 방전 내에 부가되어 스퍼터링 수율을

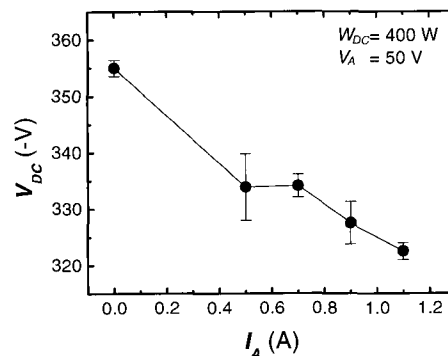


그림 4. End-Hall 이온 소스의 양극 전류(I_A)에 따른 DC 스퍼터링 전압(V_{DC})의 변화. $W_{DC}=400$ W, $V_A=50$ V, $P_{O_2}=8.3\times 10^5$ Torr, $TSD=350$ mm.

증가시킬 수 있다는 관점에서 hollow cathode로 보강된 마그네트론 스퍼터링 증착과 유사하다고 볼 수 있다. 본 연구에서 이온 소스에 아르곤 가스를 주입하지 않고 필라멘트 전류를 증가시킨 경우에는 마그네트론의 DC 스퍼터링 전압은 변화되지 않았다. 그러나 이온 소스에 아르곤 가스를 주입하고 양극 전류를 변화시킨 경우에는 DC 스퍼터링 전압이 감소되었다. 따라서 마그네트론의 DC 스퍼터링 전압이 감소되는 것은 이온 소스로부터 방출되는 아르곤 가스 이온이 마그네트론의 스퍼터링 방전에 참여하여 스퍼터링 전류를 증가시켰기 때문이다.

3.2 광학적 특성

그림 5는 증착 변수에 따른 증착된 TiO₂ 박막의 증착률(R)을 보여주고 있다. 그림 5(a)에서 보여주는 것처럼 산소 반응 가스의 부분압(P_{O₂})을 증가시킬 때, RMS로 증착된 TiO₂ 박막의 증착률은 TSD=150 mm일 때 5.2~1.4 nm/min, TSD=350 mm일 때 0.9~0.3 nm/min으로 감소하였다. 산소 반응 가스 부분압이 증가함에 따라 증착률이 감소하는 것은 타겟 표면이 반응 가스에 의해 산화층의 영역이 증가하였기 때문이다. 산화층에서는 금속에서보다 2차 전자가 방출되는 정도가 높기 때문에 스퍼터링 방전에서 아르곤 이온은 산화층을 부수는데 이용된다. 이러한 과정에서 금속을 스퍼터시키는 아르곤 이온의

수가 줄어들어, Ti의 스퍼터링 수율이 감소하여 증착률이 감소한다. TSD가 150 mm에서 350 mm로 증가할 때, 증착률은 급격히 감소하는데, 이것은 증착률(R)과 증발 소스에서 기판까지 거리(TSD)사이의 관계식인 $R \approx TSD^2$ 법칙을 따르고 있다 [24]. 반면에 그림 5(b)에서 보여주는 P_{O₂}=8.3×10⁻⁵ Torr에서 IARMS로 증착된 TiO₂ 박막의 증착률은 이온 소스의 양극 전류(I_A)를 증가시키에 따라 1.4~2.3 nm/min으로 증가하였다. TSD=350 mm에서 RMS로 증착된 박막보다 높은 값을 갖는다. 이것은 그림 4에서 설명하였던 일정한 DC 전력에서 이온 소스에 아르곤 가스 이온들에 의해 마그네트론의 스퍼터링 전류가 증가된 결과와 일치한다. End-Hall 이온 소스에서 방출되는 아르곤 가스 이온들은 스퍼터링 방전에 더해지기 때문에, IARMS는 일반적인 RMS보다 높은 스퍼터링 전류를 유도하여 증착률을 증가시킨다 [22]. RMS에서 아르곤 이온빔 보조에 의해 마그네트론의 스퍼터링 수율이 증가되는 것에 대해서는 좀더 체계적인 연구가 필요하다.

그림 6과 7은 증착 변수에 따른 TiO₂ 박막의 광학상수(굴절률(n), 소멸계수(k))의 변화를 보여주고 있다. 산소 반응 가스 부분압(P_{O₂})이 증가할 때, TSD=150 mm에서 RMS로 증착된 TiO₂ 박막의 굴절률은 그림 6(a)에서 보여주듯이 2.48에서 2.52로 증가한다. 반면에 TSD=350 mm일 때는 2.34에서 2.27로 감소한다. 이것은 굴절률이 TSD에 관계된다는

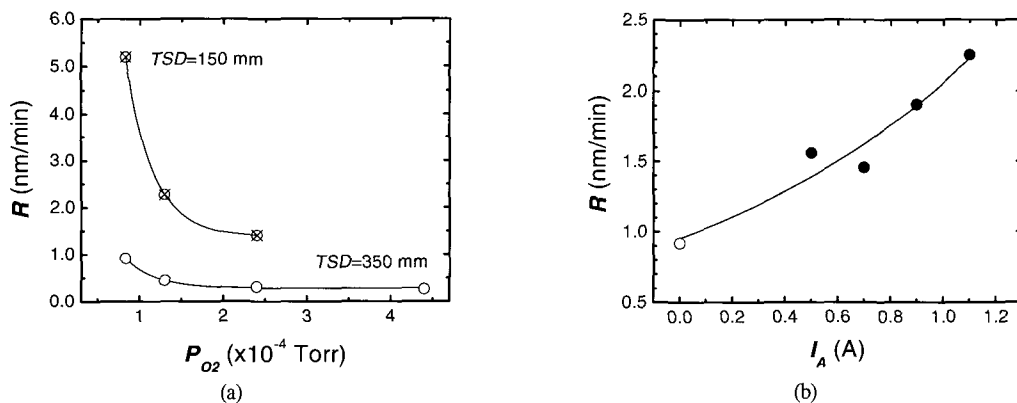


그림 5. 증착 변수에 따른 박막의 증착률(R) 변화 (a) 산소 반응 가스 부분압(P_{O₂})에 따른 RMS로 증착된 박막; TSD=150 mm(⊗), 350 mm(○), (b) 양극 전류(I_A)에 따른 IARMS로 증착된 박막; TSD=350 mm. I_A=0 A(○)는 TSD=350 mm에서 RMS로 증착된 박막을 나타낸다.

이온빔 보조 반응이온 마그네트론 스퍼터링으로 증착된 TiO₂ 박막의 특성

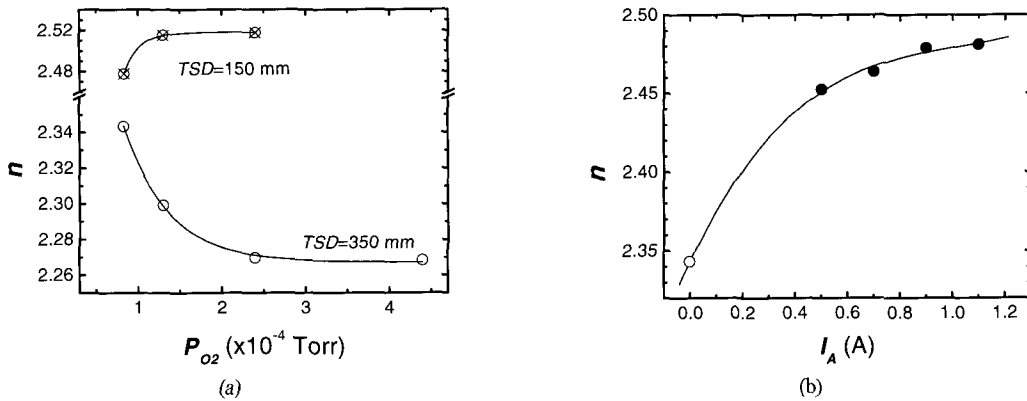


그림 6. 증착 변수에 따른 박막의 굴절률(n) 변화. (a) 산소 반응 가스 부분압(P_{O_2})에 따른 RMS로 증착된 박막; $TSD=150$ mm(\otimes), 350 mm(\circ), (b) 양극 전류(I_A)에 따른 IARMS로 증착된 박막; $TSD=350$ mm. $I_A=0$ A(\circ)는 $TSD=350$ mm에서 RMS로 증착된 박막을 나타낸다.

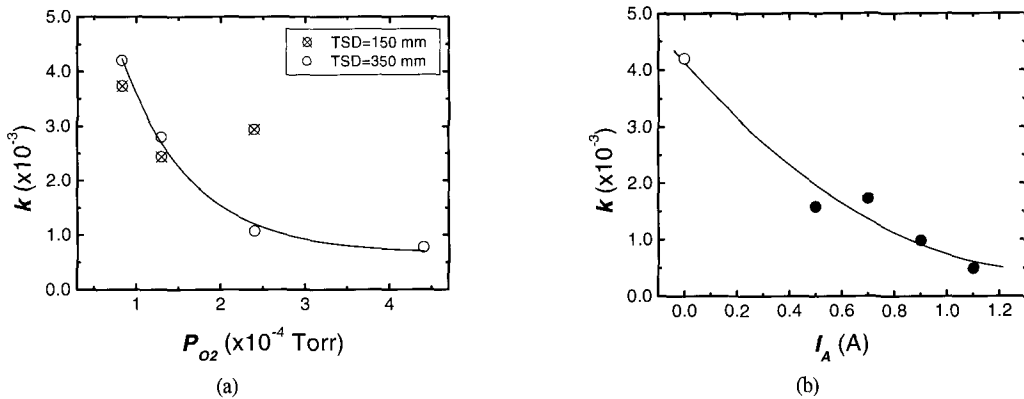


그림 7. 증착 변수에 따른 박막의 소멸계수(k) 변화. (a) 산소 반응 가스 부분압(P_{O_2})에 따른 RMS로 증착된 박막; $TSD=150$ mm(\otimes), 350 mm(\circ), (b) 양극 전류(I_A)에 따른 IARMS로 증착된 박막; $TSD=350$ mm. $I_A=0$ A(\circ)는 $TSD=350$ mm에서 RMS로 증착된 박막을 나타낸다.

것을 의미한다. $TSD=350$ mm일 때보다 $TSD=150$ mm일 때 증착된 TiO₂ 박막이 높은 굴절률을 보이는 것은 기판이 마그네트론과 가까워서 스퍼터링 방전에서 기판으로 열이 충분히 전달되어 기판 위에 형성되는 증착입자의 이동도가 증가되었기 때문이다. 또한 동일한 압력 하에서 TSD 가 길어지면 스퍼터된 입자의 진행거리가 길어져 분위기 가스와의 충돌이 많이 일어나게 되어 기판에 도달하는 Ti 입자의 에너지가 감소하게 된다. 이것은 증착된 박막의 조밀도 변화에서, $TSD=350$ mm에서 증착된 박막이 $TSD=150$ mm에서 증착된 박막보다 낮은 조밀도를

보이는 것으로부터 알 수 있다(그림 8). 그림 6(b)에서는 IARMS로 증착된 TiO₂ 박막의 굴절률은 양극 전류(I_A)가 증가함에 따라 2.45에서 2.48로 증가하였다. 이온빔 보조된 TiO₂ 박막의 굴절률은 $TSD=150$ mm에서 RMS로 증착된 박막의 굴절률에 가까우며, $TSD=350$ mm에서 RMS로 증착된 박막의 굴절률보다 높아졌다. 한편, 그림 7(a)에서 보여주는 산소 반응 가스 부분압(P_{O_2})의 증가에 따라 RMS로 증착된 TiO₂ 박막의 소멸계수는 $TSD=150$ mm일 때 0.0024~0.0037이고 $TSD=350$ mm일 때 0.0042에서 0.0008로 감소하였다. $TSD=150$ mm에서 RMS로 증착된 TiO₂

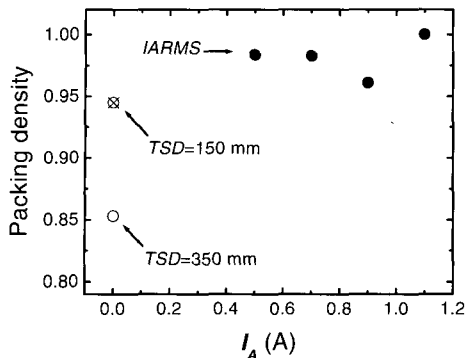


그림 8. 양극 전류(I_A)에 따른 박막의 조밀도 변화; $TSD=350$ mm. $I_A=0$ A는 각각 $TSD=150$ mm(\times)와 350 mm(\circ)에서 RMS로 증착된 박막을 나타낸다.

박막은 $TSD=350$ mm에서 증착된 박막보다 높은 굴절률과 소멸계수를 가진다. 반면에 그림 7(b)에서 보여주는 IARMS로 증착된 TiO_2 박막의 소멸계수는 0.0017에서 0.0005로 감소하였다. 이것은 기판 위에 성장하는 TiO_2 박막에 아르곤 이온들이 충돌하여 기판 위에서 산소와 Ti의 반응을 증가시켰기 때문에 아주 낮은 흡수를 나타내는 것으로 보인다.

3.3 구조적 특성

광학박막의 조밀도는 박막의 총 부피(빈공간+기둥)에 대한 기둥 부피의 비로 정의되는데, 박막의 기둥 부분과 빈공간으로 이루어진 박막에서 기둥부분의 정도를 나타내는 변수로 사용할 수 있다 [25]. 일반적으로 증발 증착된 박막의 미세구조는 덩어리에 비해 조밀하지 못하기 때문에 박막의 조밀도는 1보다 작다. 박막의 조밀도는 진공-공기간 스펙트럼 이동을 측정하여 결정할 수 있다 [18,19]. 그림 8은 증착된 TiO_2 박막에 대한 조밀도의 변화를 보여주고 있다. IARMS로 증착된 TiO_2 박막은 0.96에서 거의 1에 가까운 조밀도를 가졌다. 반면에 RMS로 증착된 TiO_2 박막의 조밀도는 대표적으로 $TSD=150$ mm일 때 0.95, $TSD=350$ mm일 때 0.85를 가졌다. 이것은 긴 타깃-기판 거리(TSD)에서 RMS로 증착된 TiO_2 박막의 낮은 조밀도를 이온빔 보조 증착으로 높일 수 있음을 보여준다.

그림 9는 AFM으로 측정된 TiO_2 박막의 표면형

상을 보여주고 있다. $TSD=150$ mm에서 RMS로 증착된 TiO_2 박막의 표면거칠기는 제곱-평균-제곱근 (root-mean-square)의 값으로 8.17 nm이고 그림 9(a)에서 AFM으로 측정된 표면 형상을 보여주고 있다. 그림 9(b)에서 $TSD=350$ mm일 경우 RMS로 증착된 박막의 표면거칠기는 1.13 nm이다. 반면에 IARMS로 증착된 TiO_2 박막은 양극 전류(I_A)가 증가함에 따라 0.99~1.35 nm의 표면거칠기를 가지며, $I_A=0.5$ A일 때의 표면형상을 그림 9(c)에서 보여주고 있다. IARMS로 증착된 TiO_2 박막의 표면거칠기는 RMS로 증착된 박막의 표면 거칠기보다 작다. 이것은 성장하는 박막에 아르곤 이온들이 충돌하여 기판 표면에서의 Ti 입자의 이동도를 증가시켰기 때문이다. 그러나 양극 전류가 클 경우에는 기판에 많은 아르곤 이온들이 충돌하여 표면거칠기가 약간 증가하였다.

그림 10의 XRD 스펙트럼은 $TSD=150$ mm에서 RMS로 증착된 TiO_2 박막이 루타일 (110)와 (211) 피크들을 가지는 다결정 구조를 보여주고 있다. $TSD=350$ mm에서 RMS로 증착된 박막과 IARMS로 증착된 박막은 모두 비정질이다. $TSD=150$ mm에서 RMS로 증착된 박막이 다결정 구조를 보이는 것은 기판이 마그네트론과 가까워서 기판에 스퍼터링 방전의 열이 충분히 전달되었기 때문이다. 증착되는 박막에 대한 아르곤 이온빔의 충돌 효과는 양극 전압이 낮기 때문에 TiO_2 박막의 결정 위상을 변화시키지 않은 것으로 생각된다.

이상의 실험 결과에서 짧은 타깃-기판 거리에서 RMS에서 증착된 TiO_2 박막은 높은 굴절률과 조밀도를 가지는 반면에 흡수가 높고 박막의 표면이 거칠다. 그러나 긴 타깃-기판 거리에서 RMS로 증착된 TiO_2 박막은 굴절률과 조밀도가 감소하지만 박막의 흡수가 낮고 표면거칠기가 작아진다. 한편, 긴 타깃-기판 거리에서 IARMS로 증착한 경우, 아르곤 이온빔의 충돌 효과에 의해 굴절률과 조밀도가 높고 흡수가 낮으며 매끄러운 표면을 가지는 비정질의 TiO_2 박막을 얻을 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 DC 반응이온 마그네트론 스퍼터링이 일어나는 동안 end-Hall 이온 소스를 이용하여

이온빔 보조 반응이온 마그네트론 스퍼터링으로 증착된 TiO₂ 박막의 특성

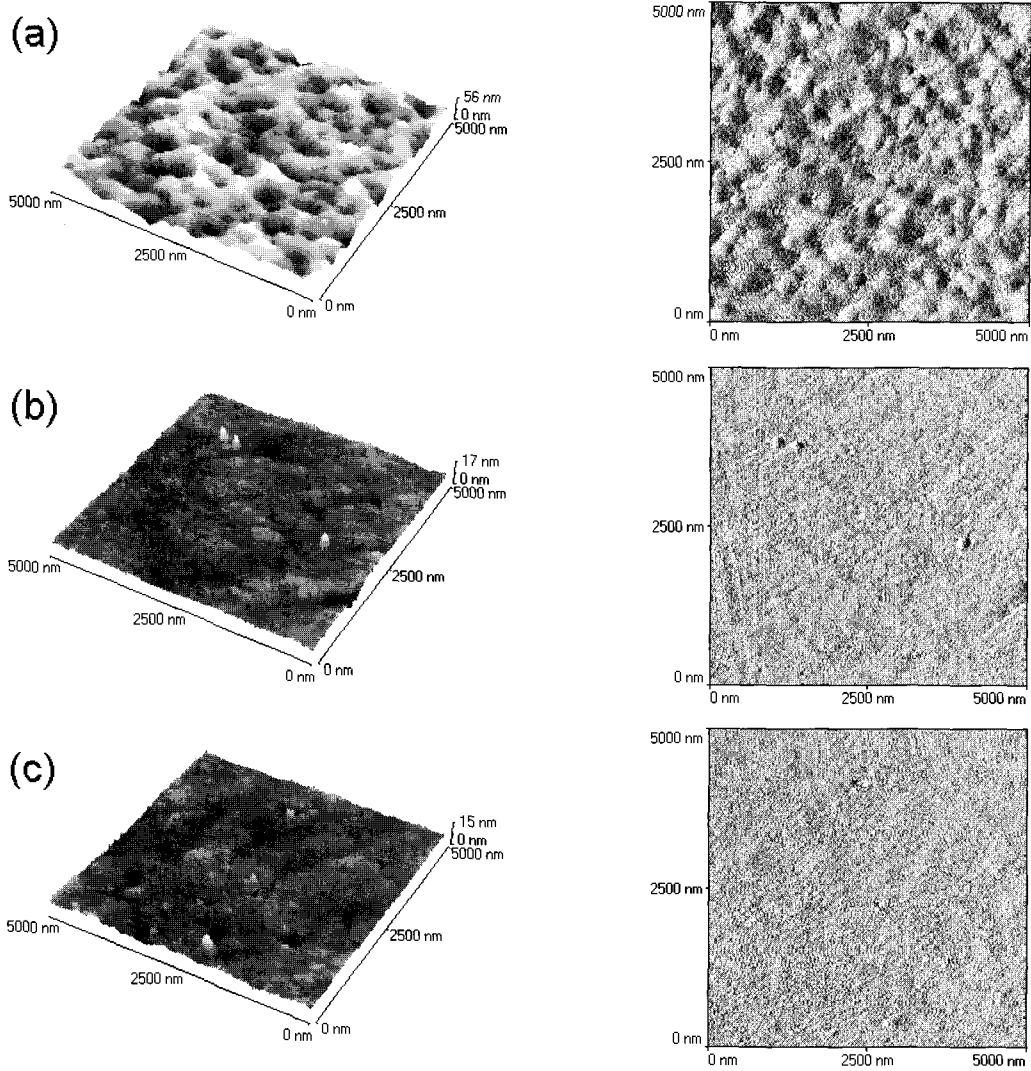


그림 9. 증착 변수에 따른 박막의 AFM 표면 형상. (a) $TSD=150$ mm와 (b) 350 mm에서 RMS로 증착된 박막의 경우이고, (c) $TSD=350$ mm에서 IARMS로 증착된 박막의 경우이다. $W_{DC}=400$ W, $P_{O_2}=8.3 \times 10^{-5}$ Torr, $V_A=50$ V, $I_A=0.5$ A. 각각의 경우 표면거칠기는 (a) 8.17 nm, (b) 1.13 nm, (c) 0.99 nm이다.

아르곤 이온빔 보조 증착을 해 주는 것이 조밀도가 높고 매끄러운 표면을 가지는 비정질의 TiO₂ 박막을 증착하는데 있어서 효과적임을 보여주었다. 일반적인 반응이온 마그네트론 스퍼터링에서 타겟-기판 거리(TSD)를 350 mm로 증가시켜 증착된 TiO₂ 박막의 경우, $TSD=150$ mm에서 증착된 박막에 비해 표면거칠기와 흡수는 상당히 낮아졌으나 박막의 증착률과 굴절률, 조밀도는 감소하였다. 반면에, 아르곤 이온빔을 증착되는 박막의 표면에 쏘아줌으로

써, TSD 증가로 감소된 TiO₂ 박막의 굴절률과 조밀도는 충분히 증가시켰으며 소멸계수는 더욱 감소시켰다. 박막의 표면거칠기는 $TSD=350$ mm에서 증착된 박막과 동일한 정도의 값을 가졌다. 그리고 $TSD=150$ mm에서 증착된 TiO₂ 박막은 다결정성을 보였으나 $TSD=350$ mm에서 증착된 박막들은 모두 비정질이었다. 이온빔 보조 증착된 TiO₂ 박막의 경우, end-Hall 이온 소스에서 방출되는 아르곤 이온들이 마그네트론의 스퍼터링 방전에 참여하여 스퍼터링

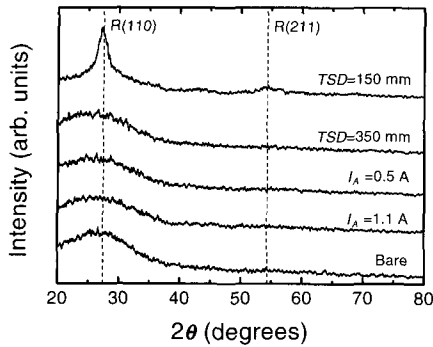


그림 10. 증착 변수에 따른 박막의 XRD 스펙트럼. TSD=150 mm와 350 mm에서 RMS로 증착된 박막, TSD=350 mm에서 $I_A=0.5$ A와 1.1 A로 IARMS으로 증착된 박막, 그리고 깨끗한 유리 기판의 스펙트럼을 보여주고 있다. $W_{DC}=400$ W, $P_{O_2}=8.3 \times 10^{-5}$ Torr, $V_A=50$ V.

전류를 증가시켜 주었기 때문에 박막의 증착률이 향상되었으며, 이온 소스에서 방출되는 아르곤 이온의 운동량이 기판에 증착되는 입자들에 운동량을 전달되었기 때문에 박막의 굴절률과 조밀도가 증가되었고 흡수가 낮아졌다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(98-0702-03-01-3)지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] R. F. Bunshah, in *Handbook of deposition technologies for films and coatings: Science, Technology and Applications* 2nd ed.(Noyes Publications, New Jersey, 1994), p.249.
- [2] A. Kinbara, E. Kusano, and I. Kondo, *Vacuum* **51**(4), 475 (1998).
- [3] J. L. Vossen and W. Kern, in *Thin Film Processes II* (Academic Press, Inc., New York, 1991), p.191.
- [4] R. P. Howson, N. Danson, and I. Safi, *Thin Solid Films* **351**, 32 (1999).
- [5] N. Martin, A. R. Bally, P. Hones, R. Sanjinés, and F. Lévy, *Thin Solid Films* **377-378**, 550 (2000).
- [6] E. Kusano and A. Kinbara, *Thin Solid Films* **281-282**, 423 (1996).
- [7] I. Safi, *Surf. Coat. Technol.* **127**, 203 (2000).
- [8] J. C. Sellers, *Surf. Coat. Technol.* **94-95**, 184 (1997).
- [9] J. Szczyrbowski, G. Bräuer, M. Ruske, G. Teschner, and A. Zmelty, *J. Non-Cryst. Solids* **218**, 262 (1997).
- [10] J. Szczyrbowski, G. Bräuer, M. Ruske, J. Bartella, J. Schroeder, and A. Zmelty, *Surf. Coat. Technol.* **112**, 261 (1999).
- [11] S. Mohan and M. G. Krishna, *Vacuum* **46**(7), 645 (1995).
- [12] H. Takashashi, *Appl. Opt.* **34**(4), 667 (1995).
- [13] M. Gilo and N. Croitoru, *Thin Solid Films* **283**, 84 (1996).
- [14] H. K. Pulker, *Surf. Coat. Technol.* **112**, 250 (1999).
- [15] M. A. Scobey, US Patent 5,851,365, issued Dec. 22, 1998.
- [16] R.-Y. Tsai, C. S. Chang, C. W. Chu, T. Chen, F. Dai, D. Lin, S. Yan, and A. Chang, *Appl. Opt.* **40**(10), 1593 (2001).
- [17] 황보창권, 박막광학 (다성출판사, 서울, 2001), p.251.
- [18] C. K. Hwangbo and H. J. Cho, *The Review of Laser Engineering* **24**, 103 (1996).
- [19] H. J. Cho and C. K. Hwangbo, *Appl. Opt.* **35**(28), 5545 (1996).
- [20] N. Martin and C. Rousselot, *Surf. Coat. Technol.* **110**, 158 (1998).
- [21] J. J. Cuomo and S. M. Rossnagel, *J. Vac. Sci. Technol.* **A4**(3), 393 (1986).
- [22] R. Adachi and K. Takeshita, *J. Vac. Sci. Technol.* **20**(1), 98 (1982).
- [23] J. L. Vossen and W. Kern, in *Thin Film Processes II* (Academic Press, Inc., New York, 1991), p. 69.
- [24] H. K. Pulker, in *Coatings on glass* (Elsevier, Amsterdam, 1984), p. 174.
- [25] H. A. Macleod, in *Thin-film optical filters* 2nd ed. (Macmillan, New York, 1986), p. 398.