한국표면공학회지
J. Kor. Inst. Surf. Eng.
Vol. 39, No. 3, 2006.
<연구논문>

유도결합 플라즈마 스퍼터링을 이용한 플라스틱 기판 상의 Al이 도핑된 ZnO 박막 증착

정승재*, 한영훈, 이정중
서울대학교 재료공학부

Deposition of Al Doped ZnO Films Using ICP-assisted Sputtering on the Plastic Substrate

Seung-Jae Jung*, Young-Hun Han, Jung-Joong Lee
School of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received 25 May 2006 ; accepted 15 June 2006)

Abstract

Al-doped ZnO (AZO) films were deposited on the plastic substrate by inductively coupled plasma (ICP) assisted DC magnetron sputtering. The AZO films were produced by sputtering a metallic target (Zn/Al) in a mixture of argon and oxygen gases. AZO films with an electrical resistivity of ~10^{3} Ωcm and an optical transmittance of 80% were obtained even at a low deposition temperature. In-situ process control methods were used to obtain stable deposition conditions in the transition region without any hysteresis effect. The target voltage was controlled either at a constant DC power. It was found that the ratio of the zinc to oxygen emission intensity, I (O 777)/I (Zn 481) decreased with increasing the target voltage in the transition region. The Ar/O_2 plasma treatment improve the adhesion strength between the polycarbonate substrate and AZO films.

Keywords: Al-doped ZnO (AZO), Inductively coupled plasma (ICP), Reactive sputtering, Target voltage control, Plastic substrate

1. 서 론

투명 전도막은 가시광선 영역에서 투명하고 비저항이 낮아 전극의 역할을 할 수 있는 막을 말하며, 반도성 금속 산화물이 대표적으로 사용되고 있다. 최근 평판 디스플레이의 사용이 증대되면서 투명 전극 물질에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 현재 가장 널리 사용되고 있는 투명 전도막 재료는 ITO($In_{2-x}Sn_xO_3$)로 광학적 성질과 전기적 성질이 매우 우수하지만, 고가의 In을 원료 물질로 사용하는 점과 수소 플라즈마에 노출되는 경우 특성이 열화되는 문제를 가지고 있다. 이러한 ITO의 단점을 보완할 수 있는 새로운 재료로 SnO_2나 ZnO에 적절한 불순물을 첨가한 물질에 대한 연구가 많이 진행되고 있다[1].

그 중에 특히 ZnO는 적외선 및 가시광선 영역에서의 투광성과 전기전도성이 우수하며 수소 플라즈마에 대한 내구성이 좋고, 원료가격이 비교적 낮은 점 등을 볼 때 ITO를 대체하기 위한 재료로 가장 적합하다고 여겨지고 있다. ZnO 박막의 경우 고온의 산소 분위기에서 전기적 성질의 열화 문제가 있기 때문에, Al, In, Ga 등의 여러 가지 첨가물을 사용하여 열적 불안정성을 해결하고 전기적 성질의 향상을 꾀하기도 한다[2,3]. 하지만 이러한 재료들이 ITO를 대체하기 위해서는 아직 전기 전도도의 향상 및 대면적 공정 개발 등 여러 가지 문제 해결이 필요하다.

평판 디스플레이에 사용되는 투명 전도 박막 증착은 대면적 기판에 균일한 박막의 증착을 요하기 때문에 스퍼터링법이 가장 유리하다. 그 중 DC 전

*Corresponding author. E-mail : dotome@nate.com

원을 사용한 반응성 스퍼터링법은 금속 타겟을 사용하므로 세라믹 타겟과는 달리 대면적 타겟의 제조가 용이하고 높은 증착속도를 쉽게 얻을 수 있다. 반응성 스퍼터링법에서는 산소의 유량을 변화시킴으로써 박막의 조성을 조절할 수 있는데, 산소 유량의 증가에 따른 타겟 표면의 산화로 급격히 공정조건이 바뀌는 천이영역을 가지는 hysteresis 특성을 보인다. 일반적인 반응성 스퍼터링 장치에서는 원하는 조성이 천이영역 내에서 얻어지기 때문에, 특별한 조절 장치 없이는 재현성 있는 박막의 제조가 힘들다. 이런 문제해결을 위한 방법으로는 PEM[4] (Plasma Emission Monitor), 산소 센서[5], 타겟 전압 조절법[6,7](target voltage control) 등이 있는데, 본 연구에서는 타겟 전압 조절법을 증착공정에 적용하였다. 타겟 전압 조절법은 반응성 스퍼터링 공정에서 챔버 내의 산소 분압과 타겟 전압과의 상관 관계를 이용한 것으로써 기타 방법에 비해 비교적 간단한 구성과 저렴한 장치 비용으로 공정 조절이 가능한 방법이다.

차세대 디스플레이로 많이 연구되고 있는 flexible display의 경우 기판이 플라스틱 재질이기 때문에 저온 증착 공정이 필수적이라 할 수 있겠다. 유도결합 플라즈마(Inductively Coupled Plasma: ICP)를 이용한 반응성 스퍼터링법은 반응성 기체의 분해능력이 뛰어나고 기판에의 이온 충돌 효과가 크기 때문에 저온에서도 우수한 특성의 박막 제조가 가능하다[8-10]. 본 연구에서는 타겟 전압 조절법을 이용하여 반응성 스퍼터링 공정의 안정화를 꾀하고, 플라스틱 기판 상에서도 우수한 특성을 가지는 투명전도 ZnO:Al(Al-doped ZnO: AZO) 박막을 제조하였다. 또 플라스틱 기판의 유도결합 플라즈마 처리를 통해 박막과 기판 간의 접착력을 크게 향상시켰다. 본 연구에서 사용된 유도결합 플라즈마를 이용한 증착 공정은 점차 쓰임새가 증가하고 있는 플라스틱 기판 상의 산화물 증착에 쉽게 응용될 수 있어 그 활용 가치가 크다고 할 수 있겠다.

2. 실험 방법

2.1 플라즈마 표면처리 및 증착 조건

그림 1은 플라즈마 표면처리 및 AZO 박막 증착에 사용된 장치 개략도이다. 기판과 마그네트론 사이에 유도결합 플라즈마 발생을 위한 구리 코일이 10 cm의 직경으로 2회 감겨져 있다. 절연 튜브로 실드 처리된 구리코일은 13.56 MHz의 rf 전력공급기와 매칭 박스를 통해 rf 전원을 인가받고, 반대쪽 끝은 접지로 연결되어 있다. AZO 박막 증착을 위한

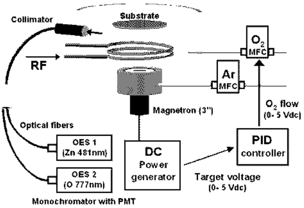

Fig. 1. The schematic diagram of the ICP-assisted DC magnetron sputter.

타겟은 3인치 크기의 Zn/Al(98.5/1.5 wt%, CERAC) 합금 타겟이 사용되었고 기판과 타겟과의 거리는 11 cm이었다. 기판으로는 2×1인치 크기의 Corning 1737 유리와 폴리카보네이트가 사용되었다.

유리 기판은 AZO 박막 증착 전에 아세톤, 에탄올, 증류수에 각각 20분간 초음파 세척 후 load-lock 챔버를 통해 기판 홀더에 장착되었다. 그리고 폴리카보네이트 기판은 에탄올, 증류수에 각각 20분간 초음파 세척 후 챔버에 장입되었고 증착 전 아르곤과 산소 분위기에서 ICP를 이용한 플라즈마 전처리가 수행된 후 AZO 박막 증착이 이루어졌다.

공정 전 챔버는 5×10^{-7} Torr 이하로 배기되었고, 플라즈마 전처리는 아르곤 10 sccm, 산소 3 sccm씩 흘려준 상태에서 20 mTorr의 공정 압력으로 5분간 수행되었다. ICP 코일에는 200 W의 파워가 인가되었고, 기판은 특별한 바이어스 전압을 가하지 않은 floating 상태에서 수행되었다. AZO 박막 증착은 폴리카보네이트 기판의 경우 아르곤 10 sccm, 공정 압력 20 mTorr, 타겟 파워 DC 100 W, ICP 파워 RF 300 W 조건에서 5분간 수행되었고, 박막의 두께는 200 nm 정도였다. 산소 유량의 경우 타겟 전압 조절장치에 의해 증착조건에 따라 변화되었고, 기판은 플라즈마 가열에 의한 변형을 막기 위해 수냉 상태에서 증착이 수행되었다. 유리 기판의 경우 타겟 파워 DC 150 W, ICP 파워 RF 100~300 W 조건에서 특별한 기판 가열없이 3분간 증착되었고 AZO 박막의 두께는 160 nm 정도였다.

2.2 특성 분석

증착된 AZO 박막의 두께는 α-step profilometer에 의해 측정되었고, 전기적 특성은 4-point probe와 van der pauw 방법에 의해 측정되었다. 광학적 투과율은 UV/vis spectrometer에 의해 측정되었고, x-

ray diffraction(XRD)을 이용해 박막의 우선방위를 분석하였다. 표면 거칠기를 측정하기위해 atomic force microscopy(AFM)이 사용되었고, 폴리카보네이트 기판과 AZO 박막의 접착력을 ASTM D3359 법으로 평가하였다.

타겟 전압 조절법을 사용하였을 때 챔버 내의 스퍼터된 Zn과 O_2의 양 변화를 측정하기 위해 optical emission spectrometer(OES) 분석을 수행하였다. 그림 1에서와 같이 챔버의 상층에 연결된 광케이블을 통해 2대의 Verity Instruments EP200 monochromator로 optical emission을 측정하여 Zn과 O_2의 양을 분석하였다. 시창의 위치는 쿠리 코일과 기판 사이 높이에 위치해 있다. 이연의 경우 468, 472, 481, 636 nm의 파장이 그리고 산소의 경우 777 nm 파장이 관찰되었고, 그 중 가장 강한 강도를 나타낸 481 nm (Zn), 777 nm(O) 파장이 분석에 사용되었다.

3. 결과 및 고찰

최근 산업에서 플라스틱 기판의 이용이 점차 늘어감에 따라 플라스틱 기판 상에서도 우수한 특성의 박막을 형성시킬 수 있는 공정 개발이 필요하다. 본 연구에서는 유도결합 플라즈마를 이용한 플라스틱 기판 상의 AZO 박막 증착과 타겟 전압 조절법을 통한 반응성 스퍼터링 공정의 안정화, 유도결합 플라즈마를 이용한 플라스틱 기판의 표면처리에 대해 고찰하였다.

3.1 타겟 전압 조절법

반응성 스퍼터링법은 그림 2와 마찬가지로 반응가스의 유량 변화에 따라 hysteresis 특성을 보인다.

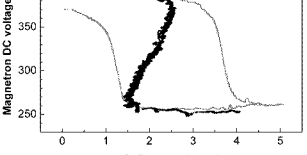

Fig. 2. The magnetron voltage shows a hysteresis loop or an inverse S-curve according to the system control (Magnetron power; 100 W, ICP power; 400 W).

산소와 같은 반응 가스의 유량이 늘어감에 따라 금속 타겟의 표면과 챔버 벽이 점차 산화물로 변하게 되고, 임계 유량에 다다르게 되면 타겟 표면이 급격히 산화되어 매우 낮은 증착 속도 영역에 도달하게 된다. 다시 산소의 유량을 줄일 경우 챔버 내에 존재하는 산소의 양이 많아 유량 증가시의 임계치보다 더 낮은 값에서 금속 표면으로 다시 환원된다[1].

일반적인 유량 조절 시스템에서는 증착 속도가 높은 metallic mode와 증착 속도가 낮은 oxide mode에서의 공정만 가능하다. Metallic mode의 경우 대개 박막 내의 산소 양이 부족한 금속성 박막이 얻어지고, oxide mode의 경우 타겟 표면이 완전히 산화물로 덮혀져 매우 낮은 증착 속도가 얻어지며 아크가 발생하기 쉬워 막의 품질이 떨어지는 문제를 가지고 있다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해 여러 가지 방법들이 사용되는데 PEM, OES, 산소 센서, 타겟 전압 조절법 등의 방법이 있다. 이들은 챔버 영역에서 스퍼터되는 금속의 양이나 산소의 분압을 실시간으로 측정하여 타겟에 인가되는 파워나 산소의 유량을 변화시킴으로써 기판으로 입사되는 금속과 산소의 양을 일정하게 유지시키는 방식이다[2]. 위에 나열된 공정 조절 장치를 이용하면 반응 가스 유량 변화에 따라 hysteresis 특성이 없는 S-curve 또는 inversed S-curve 형태를 얻을 수 있고[1] 챔버 영역 내에서도 곡선 상에 공정 조건 값에서 안정적인 박막 증착이 가능하다. 그리고 화학양론비를 갖는 박막을 oxide mode 보다 훨씬 높은 증착속도에서 얻을 수 있다. 특히 투명전도막과 같이 막의 조성 변화에 따라 특성이 민감하게 변하는 공정에는 필수라고 할 수 있겠다.

그림 2에는 타겟 전압 조절법에 의한 inversed S-curve를 보여주고 있다. 타겟 전압은 타겟 표면이 산화된 정도에 따라 금속과 그 산화물의 2차 전자 방출 계수 차이 때문에 변하게 된다. 일반적으로 금속보다 산화물의 2차 전자 방출 계수가 더욱 크므로 타겟 표면이 산화물로 더욱 많이 덮힐수록 타겟 방전 전압은 낮아지게 된다[3]. 그림 3에서 볼 수 있듯이 타겟 전압 조절법을 사용했을 때 챔버 내의 Zn과 O_2 비가 타겟 전압에 따라 변하고 있기 때문에 타겟 전압을 변수로 박막을 증착할 경우 박막의 조성 조절이 가능하다. 그림 4와 같이 타겟 전압을 일정하게 조절한 경우 공정이 진행되어도 Zn과 O_2의 양이 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 AZO 증착의 경우 타겟 전압 조절법을 사용하여 비교적 간단한 장치 구성과 저렴한 비용으로도 쉽게 공정 조절이 가능하였다. 그러나 타겟 세

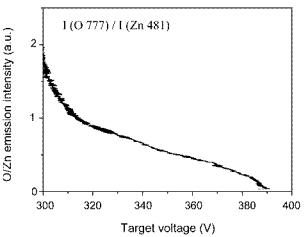

Fig. 3. The ratio of zinc to oxygen emission intensity at different target voltages (Magnetron power; 100 W, ICP power; 400 W).

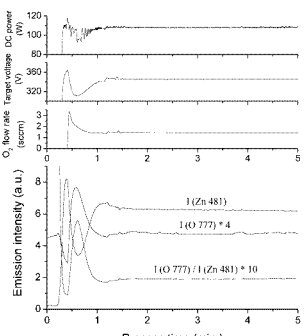

Fig. 4. DC power, target voltage, oxygen flow rate and optical emission of zinc and oxygen during the AZO deposition at the target voltage of 345 V at a constant DC power (Magnetron power; 100 W, ICP power; 400 W).

료나 반응 가스에 따라 방전 특성이 달라 질 수 있기 때문에 다른 화합물 증착에 적용하기 위해서는 더 많은 연구가 필요하겠다.

3.2 ICP 파워에 따른 AZO 박막의 특성 변화

반응성 스퍼터링법은 금속 타겟을 사용함으로써 높은 증착 속도를 얻을 수 있는 반면 지온에서 증착된 박막의 품질이 낮아 플라스틱 기판 상의 산화물 증착 연구는 이제까지 많지 않았다. 유도결합 플라즈마를 이용한 스퍼터링법은 고밀도 플라즈마에 의한 반응가스 활성화와 이온 충돌 효과가 매우 우수하여 지온에서도 우수한 특성을 가지는 박막 제조가 가능한 공정이다.

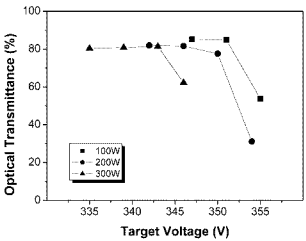

Fig. 5. The optical transmittance of the AZO films on Corning 1737 glass as a function of the target voltage at different ICP powers.

그림 5는 ICP 파워를 100, 200, 300 W로 변화시키면서 증착한 AZO 박막의 투과율을 보여주고 있다. 기판은 Corning 1737 유리가 사용되었고, 투과율은 대기 상태를 100%로 하여 400~700 nm 영역에서 평균을 내어 표시하였다. ICP 파워에 관계없이 타겟 전압이 높은 경우 비교적 낮은 투과율을 나타내었고, 타겟 전압이 감소함에 따라 투과율이 80% 이상으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 타겟 전압이 낮아질수록 챔버 내의 Zn의 양은 감소하고, O_2의 양은 증가하기 때문에 박막의 조성이 산소가 부족한 금속성 박막에서 화학양론비가 맞는 ZnO로 변해감에 따라 투과율이 증가되는 것으로 설명될 수 있다.

그림 6은 ICP 파워에 따른 박막의 전기적 특성을 보여주고 있다. 모든 ICP 파워 조건에서 타겟 전압이 낮아짐에 따라 비저항 값이 높아지는 것을 볼 수 있다. 이는 타겟 전압이 낮아짐에 따라 박막 내 산소 양이 증가하기 때문에 나타나는 현상이다. 산소의 양이 증가함에 따라 donor 역할을 하는 산소 공공의 수가 줄어듦에 따라 캐리어 농도가 감소하게 된다[13]. 그리고 산소 분압이 높은 조건에서 박막이 제조될 경우 dopant로 사용된 알루미늄이 Al_2O_3 형태로 입계에서 석출되거나 캐리어 농도 감소에 따른 입계 장벽 전위의 상승에 의해 캐리어 이동도가 감소하는 것으로 설명될 수 있다[14].

ICP 파워에 따른 차이를 살펴보면 100 W의 경우

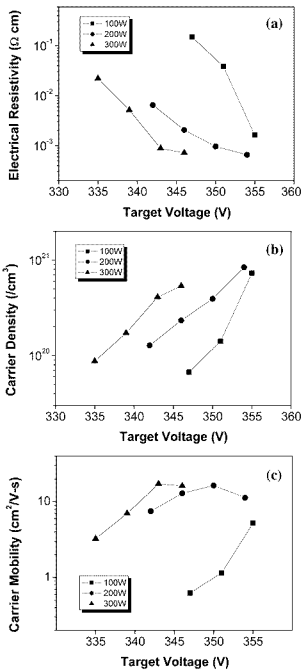

Fig. 6. The electrical properties of the AZO films on Corning 1737 glass as a function of the target voltage at different ICP powers: (a) electrical resistivity, (b) charge carrier mobility, (c) charge carrier density.

낮은 이동도 때문에 높은 비저항 값을 보인 반면 200, 300 W로 파워를 높일 경우 이동도가 10배 이상 증가하면서 비저항 값이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. ICP의 경우 코일에 인가되는 파워가 높아질 경우 플라즈마의 밀도가 거의 비례해서 증가하게 되고, 기판에 입사되는 이온의 flux가 증가하기 때문에 adatom의 이동도가 향상된다. 그림 7의 XRD 결과를 통해 ICP 파워가 증가함에 따라

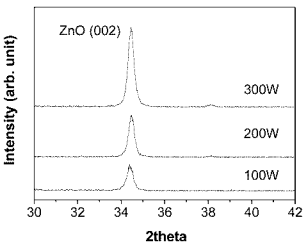

Fig. 7. The XRD data of the AZO films on Corning 1737 glass at different ICP powers.

박막의 결정성 향상에 의한 peak 강도의 증가를 확인할 수 있다. XRD 분석에 사용된 샘플은 투명성이 확보되면서 가장 낮은 비저항 값을 나타내는 샘플들로 ICP 파워 100, 200, 300 W에서 각각 타겟 전압 351, 350, 343V에서 증착된 것들이 사용되었다. 증착된 AZO 박막의 경우 다른 스퍼터링법에 의해 제조된 논문들과 마찬가지로 모두 ZnO (002) 방향의 우선 방위를 가지고 있었다. AZO 박막의 rms (root-mean-square) roughness는 ICP 파워가 증가함에 따라 41.2, 20.7, 17.3Å으로 감소하였고, 200 W 이상에서는 20Å 정도의 우수한 거칠기 특성을 보여주었다.

3.3 폴리카보네이트 상의 AZO 박막 증착

LCD, OLED 같은 평판 디스플레이의 경우 경량화나 flexible display를 위해서는 플라스틱 기판의 사용이 필수이기 때문에 플라스틱 상에서도 우수한 특성을 가지는 투명전극 증착 공정 개발은 매우 중요하다. 유도결합 플라즈마를 이용한 경우 지온에서도 우수한 특성의 박막 제조가 가능하기 때문에 본 연구에서는 폴리카보네이트 기판 위에 반응성 스퍼터링법으로 AZO 박막 증착이 이루어졌다.

그림 8은 폴리카보네이트 기판에 증착된 AZO 박막의 투과율을 보여주고 있다. 유리 위에 증착된 AZO 박막과 마찬가지로 타겟 전압이 감소함에 따라 박막의 투과율이 증가하는 경향을 보여주었다. 타겟 전압 340 V에서는 70% 정도의 약간 불투명한 박막이 얻어졌지만, 335 V 이하에서는 거의 80% 정도의 우수한 가시광선 투과 특성을 나타냈다. 335, 340 V의 경우 330, 325 V 보다 훨씬 영역 경계가 단파장 쪽으로 이동된 것을 알 수 있는데, 이는 캐리어 농도 증가에 따른 Burstain-Moss 효과에 의한

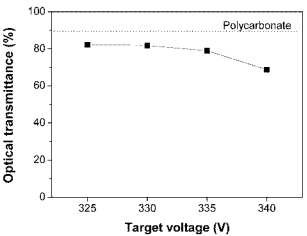

Fig. 8. The optical transmittance of the AZO films on polycarbonate substrate as a function of the target voltage.

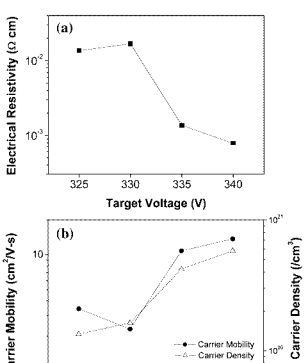

Fig. 9. The electrical properties of the AZO films on polycarbonate substrate as a function of the target voltage: (a) electrical resistivity, (b) charge carrier mobility and density.

밴드갭 확장으로 설명될 수 있다[15,16]. 그림 8에서 335, 340 V 샘플의 경우 330, 325 V 샘플에 비해 $4\times10^{20}/cm^3$ 이상의 높은 캐리어 농도를 갖는 것을 확인할 수 있다.

폴리카보네이트 기판에 증착된 AZO 박막의 전기적 특성은 그림 9에 나타내었다. 역시 유리 기판에 증착된 박막과 마찬가지로 타겟 전압이 감소함에 따라 비저항이 증가하는 경향을 보여주었다. 타겟 전압 감소와 함께 박막 내의 산소 함량이 증가함에 따라 캐리어 농도와 이동도가 유리 기판에서와 같이 감소되었다. 기판이 수냉된 상태에서 반응성 스퍼터링법으로 증착된 박막일에도 불구하고 타겟 전압 335 V 샘플의 경우 가시광선 투과율 80% 정도에 $1.4\times10^{-3}\Omega cm$의 우수한 비저항 특성을 보였다.

플라스틱 기판의 경우 일반적으로 표면에너지가 낮아 특별한 처리 없이 금속이나 세라믹을 증착하게 되면 기판과 박막간의 접착력이 매우 좋지 않다. 박막 증착의 접착력이 좋지 않을 경우 제조 공정 과정이나 사용 중에 떨어지게 되어 제품의 치명적 불량원인이 된다. 그래서 접착력 향상을 위해 박막 증착 공정 전에 플라즈마 표면처리를 많이 수행한다. 아르곤과 산소의 혼합가스 분위기에서 플라즈마 처리를 한 경우, 아르곤 이온 입자들의 충돌로 인하여 고분자들을 구성하는 원소들 간의 일부 결합이 끊겨 표면에 반응을 유도하는 라디칼이나 불안정한 사슬이 형성이 되고 반응성 가스인 산소와 결합하여 고분자의 표면에 새로운 형태의 카르보닐(-C=O), 카르복실(-COOH), 알데하드(-CHO) 그룹 등의 친수성 작용기가 형성된다. 이들 친수성 작용기는 다른 물질과의 접착력을 크게 향상시키는 것으로 알려져 있다[17,18].

그림 10에는 플라즈마 표면처리 되지 않은 폴리카보네이트 기판과 ICP 파워 100 W, 200 W에서 표면처리 된 기판의 테이프 테스트 결과를 보여주고 있다. 표면처리 되지 않은 샘플의 경우 테이프가 붙이진 부분이 모두 떨어져나가는 매우 나쁜 접착력을 보여준 반면, 플라즈마 처리가 이루어진 두 샘플의 경우 전혀 떨어지지 않은 것으로 보아 접착력이 비약적으로 향상된 것을 확인할 수 있다.

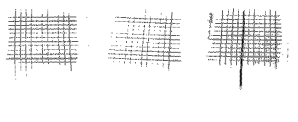

Fig. 10. The images of the AZO films on polycarbonate films after ASTM D3359 tape test.

4. 결 론

유도결합 플라즈마를 이용한 스퍼터링법으로 폴

라스틱 기판 상에서도 우수한 특성을 가지는 AZO 박막을 증착하였다. 타겟 전압 조절법을 이용하여 천이영역에서도 안정적인 공정이 가능하였고, 폴리카보네이트 기판 위에 증착된 AZO 박막은 가시광선 투과율 80%, 비저항 $1.4\times10^{-3}\Omega$cm의 우수한 특성을 보여 산업 응용의 충분한 가능성을 확인하였다. ICP 파워가 증가할 경우 기판에 입사되는 이온의 양이 늘어나 박막의 결정성이 향상됨으로써 AZO 박막의 전기적 특성이 개선되었다. 유도결합 플라즈마를 이용한 폴리카보네이트 기판의 표면처리는 기판과 박막 간의 접착력을 크게 향상시켰다.

참고문헌

1. T. Minami, Semicon. Sci. Technol., 20 (2005) S35.
2. T. Minami, S. Suzuki, T. Miyata, Thin Solid Films, 398-399 (2001) 53.
3. M. Chen, Z. L. Pei, X. Wang, C. Sun, L. S. Wen, J. Vac. Sci. Technol., A19 (2001) 963.
4. S. Schiller, U. Heisig, K. Steinfelder, J. Strümphel, R. Voight, G. Teschner, Thin Solid Films, 96 (1982) 235.
5. G. Szczyrbowski, G. Teschner, J. Bruch, European patent specification EP 0795623A1, (1997).
6. H. Czternastek, A. Brudnik, M. Jachimowski, E. Kolawa, J. Phys. D: Appl. Phys., 25 (1992) 865.
7. J. Affinito, R. R. Parsons, J. Vac. Sci. Technol. A, 2(3) (1984) 1275.
8. H. D. Na, H. S. Park, D. H. Jung, G. R. Lee, J. H. Joo, J. J. Lee, Coat. Technol., 169-170 (2003) 41.
9. Y. H. Han, S. J. Jung, J. J. Lee, J. H. Joo, Surf. Coat. Technol., 174-175 (2003) 235.
10. S. J. Jung, B. M. Koo, Y. H. Han, J. J. Lee, J. H. Joo, Surf. Coat. Technol., 200[1-4] (2005) 862.
11. S. Berg, T. Nyberg, Thin Solid Films, 476 (2005) 215.
12. I. Safi, Surf. Coat. Technol., 127 (2000) 203.
13. K. Ellmer, J. Phys. D: Appl. Phys., 33 (2000) R17.
14. T. Tsurumi, S. Nishizawa, N. Ohashi, T. Ohgaki, Jpn. J. Appl. Phys., 38 (1999) 3682.
15. E. Burstein, Phys. Rev., 93 (1954) 632.
16. T. S. Moss, Proc. Phys. Soc. London B, 67 (1954) 775.
17. W.-K. Choi, S.-K. Koh, H.-J. Jung, J. Vac. Sci. Technol., A14 (1996) 2366.
18. E. T. Kang, K. L. Tan, K. Kato, Y. Uyama, Y. Ikada, Macromolecules, 29 (1996) 6872.