

Ionized Cluster Beam 증착방법을 이용한 Indium-Tin-Oxide(ITO) 박막의 제작과 그 특성에 관한 연구

최성창 · 황보상우 · 조만호 · 김남영* · 홍창의*
이덕형** · 심태언** · 황정남

연세대학교 물리학과 *숭실대학교 물리학과 **삼성전자(주) 반도체연구부
(1995년 12월 29일 접수)

A Study on the Fabrication and Characteristics of ITO thin film deposited by the Ionized Cluster Beam Deposition

S.C. Choi, S.W. Whangbo, M.H. Cho, N.Y. Kim*, C.E. Hong*,
D.H. Lee**, T.E. Shim** and C.N. Whang

Department of Physics, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

**Department of Physics, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea*

***Semiconductor Research Center, Samsung Electronics Co., Ltd., Suwon 440-600, Korea*

(Received December 29, 1995)

요 약 - Ionized Cluster Beam Deposition(ICBD) 방법을 이용하여 glass 기판 위에 indium을 증착하고, 동시에 tin을 thermal evaporation시켜 doping하면서 oxygen gas를 흘려주는 방식으로 ITO 박막을 제작하였다. 제작된 ITO 박막의 특성을 XPS, GXR, 4-point-probe, Hall-effect 측정장치를 통하여 조사해 보았다. 그 결과 XPS 분석을 통하여 indium과 tin이 각각 산소와 결합한 형태인 In_2O_3 와 SnO_2 로 존재함을 알 수 있었고, GXR spectrum 분석으로 박막내의 tin 함유량이 14%를 넘게 되면, 주 peak인 (222)면 이외에 다른 부 peak들과 함께 SnO_2 peak까지 확인되는 것으로 보아 일정량 이상의 Sn doping은 오히려 박막의 결정성 향상에 저해 요소가 됨을 알 수 있었다. 또한 박막의 전기적 특성을 알아보기 위하여 4-point-probe 와 Hall을 측정 한 결과 가장 좋은 전기적 특성을 가진 시료의 경우 비저항이 $\rho = 3.55 \times 10^{-4} \Omega cm$ 이며 carrier mobility가 $42.8 \text{ cm}^2/Vsec$ 임을 확인할 수 있었고 가시광선 영역에서 90% 이상의 투과율을 나타내었다.

Abstract - Indium-tin oxide (ITO) films were deposited on the glass substrate by the reactive-ionized cluster beam deposition(ICBD) method. In the oxygen atmosphere, indium cluster formed through the nozzle is ionized by the electron bombardment and is accelerated to be deposited on the substrate. And tin is simultaneously evaporated from the boron-nitride crucible. The characteristics of films were examined by the X-ray photoelectron spectroscopy(XPS), glancing angle X-ray diffraction(GXR) and the electrical properties were measured by 4-point-probe and Hall effect measurement system. From the XPS spectrum, it was found that indium and tin atoms combined with the oxygen to form oxide(In_2O_3 , SnO_2). In the case of films with high tin-concentration, the GXR spectra show that the main In_2O_3 peak of (222) plane, but also sub peaks((440) peak etc.) and SnO_2 peaks were detected. From that results, it is concluded that the heavily doped tin component (more than 14 at. %) disturbs to form In_2O_3 (222) phase. Four-point-probe and Hall effect measurement show that, in the most desirable case, the transmittance of the films is more than 90% in visible range and its resistivity is $\rho = 3.55 \times 10^{-4} \Omega cm$ and its mobility is $\mu = 42.8 \text{ cm}^2/Vsec$.

1. 서 론

전도성 투과 박막에 관한 연구는 1960년대 이래로 그 폭넓은 응용성에 힘입어 지금까지도 꾸준히 이루어지고 있다. 높은 광 투과율(80% 이상)과 함께 좋은 전기전도도 (비저항 $10^3 \Omega\text{cm}$ 정도)를 동시에 가진 물질은 일반적으로 거의 존재하지 않는다. 물론 박막을 만들면 어느 정도의 광 투과율과 전도성을 얻을 수는 있다. 하지만 위에서 언급한 조건을 만족하는 물질을 얻기 위한 유일한 방법이라 할 수 있는 것은 조성비 엇갈림을 이용하거나 적절한 dopants를 사용하여 산화물 반도체의 넓은 band-gap (약 3 eV 이상)내에 전자 축퇴 (electron degeneracy)를 인위적으로 만들어 주는 것이다[1]. 이에 따라 현재 많이 연구되고 있는 물질들로는 cadmium, tin, indium, zinc 등을 들 수 있고, 그 예로는 antimony-doped tin oxide (ATO), fluorine-doped tin oxide(FTO), tin-doped indium oxide(ITO), cadmium stannate(CTO) 등을 들 수 있으며, 그 중에서도 In_2O_3 에 tin을 doping시켜 제작하는 indium-tin oxide(ITO) 박막은 격자 상수가 보통 $10.118 \text{ \AA} < a < 10.31 \text{ \AA}$ 이며, grain size는 $400 \sim 600 \text{ \AA}$ 정도인 것으로 보고되고 있다 [2]. 제작이 비교적 용이하다는 이점과 함께 위에서 언급한 두 가지의 중요한 조건을 잘 만족하는 성질을 나타냄으로 이를 이용하여 태양전지의 selective filter나 열 반사 거울, LCD와 같은 광전 소자, gas sensor등에 이용하고 있으며, 또한 박막의 안정성 및 hardness가 우수하고 여러 종류의 기판에 대해서도 비교적 좋은 접합력을 갖기 때문에 전도성 전극이나 무반사 코팅에도 사용하고 있다[3][4].

이러한 박막을 제작하는데 사용되고 있는 방법에는 주로 sputtering[5][6]을 이용한 방법이 있고, 그 외에 chemical vapor deposition(CVD)[7], evaporation, e-beam 증착법[8][9], reactive ion plating [10], spray pyrolysis, chemical solution growth 등 다양한 방법들이 쓰이고 있으나, 본 논문에서는 이온화 분자선을 이용하여 박막을 제작하였는데, 이 방법은 1972년 Kyoto 대학에서 개발된 것[11]으로 시료를 nozzle을 통해 분사시킴으로써 증기 분자를 cluster로 만들어서 기판에 증착시키는 방

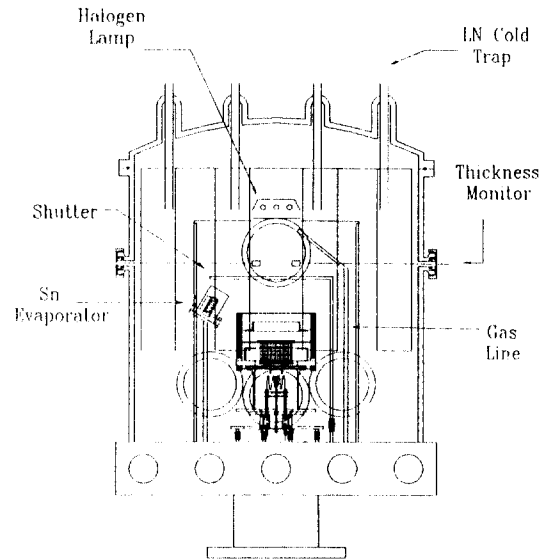


그림 1. ICBD 장치의 개략도.

법으로 박막의 물성을 조절할 수 있는 장점이 있다. ICBD 방법은 부도체인 기판에 대해서도 전자 축퇴에 의한 방해 제거할 수 있으므로 두꺼운 성장 층을 얻을 수 있다[12]. 또한 금속뿐만 아니라 polymer의 경우도 ICBD를 이용하면 결정성, 전기전도도, chain 구조 등을 변화시킬 수 있다고 알려져 있다[13][14][15]. 이상과 같은 ICBD 방법을 이용하여 O_2 분위기에서 indium을 증착하면서 동시에 기판 아래에 tin evaporator를 장치하여 tin을 doping시키는 방법으로 ITO박막을 제작하였다. 본 연구에서는 ICBD 방법을 통하여 resistivity가 $\rho = 3.55 \times 10^4 \Omega\text{cm}$ 이고 mobility가 $\mu = 42.8 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$ 이며, 전하 농도가 $n = 7.5E + 20 \text{ cm}^{-3}$ 인 박막을 얻을 수 있었다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용한 장치의 개략도는 그림 1과 같다. 이 장치는 크게 indium시료를 기화하여 cluster를 형성시키는 cluster source 부분과 tin doping을 위한 tin-evaporator 그리고 증착 시킬 기판을 고정시키고 기판 온도를 변화시킬 수 있는 sample holder로 구성되어 있고 최저 진공도는 7×10^{-7} Torr 였다.

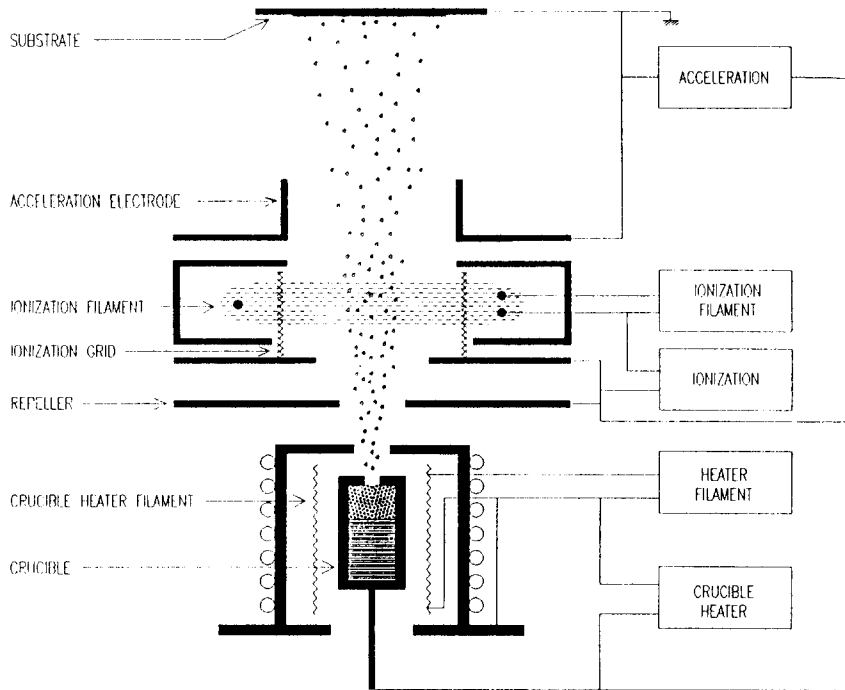


그림 2. ICB 장치의 전위 배치도.

Indium-cluster를 위한 crucible은 외경 13 mm, 높이 22 mm로서 carbon 재질로 만들었으며, 직경 1 mm, 높이 2 mm의 cylinder형 nozzle을 사용하였다. 또한 전자 충격을 통해 crucible의 온도를 올려 주었고 crucible에 가해진 열이 복사되는 것을 방지하기 위해 molybdenum-plate로 shielding해 주었다. 또한 filament에서 방사되는 복사열을 차단하고 crucible 주위의 진공도를 향상시키기 위해 crucible을 둘러싼 housing 외부에 cooling-pipe를 설치하여 물을 순환시켜 냉각효과를 내도록 하였다. 그리고 tin-evaporator의 경우 BN(boron nitride)를 crucible 모양으로 만들고 외부에 0.6 mm tungsten-wire filament를 감아 저항 가열법을 이용해 온도를 올려 주었다. 산소 gas는 gas-inlet line을 통해 기관 아래부분에서 분사되도록 장치하였다. 생성된 cluster의 이온화를 위해 직경 0.6 mm인 1% thoriated tungsten filament를 사용한 전자총을 nozzle에서 45 mm 떨어진 곳에 설치하여 cluster가 grid 내부를 통과해 나가는 과정에서 수직으로 입사되는 전자에 의한 충격으로 이온화되게 하였다.

이때 filament와 grid 사이의 전위차는 0~300 V 이고 전류는 0~150 mA 에서 사용하였다. Ionizer 윗부분에는 가속단을 두어 이온화된 cluster를 가속시켰으며, 가속단 위에 collimator를 접지 상태에 두어 기관 상의 증착이 균일하게 이루어지도록 하였다. Crucible에서 350 mm 떨어진 곳에 stainless steel로 만든 기관 고정대와 기관을 heating 하도록 halogen lamp를 함께 설치하였으며 동시에 기관 온도 측정을 위하여 chromel-alumel 접합형의 열전쌍을 기관 표면 위에 설치하였고, 기관 고정대 아래에 Faraday-cup을 설치하여 이온화된 cluster의 전류를 측정하였고, 측정된 전류는 대략 $0.8 \sim 5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 정도로서 증착조건 변화에 따른 의존도가 비교적 높게 관찰되었다. Crucible의 온도측정은 optical-pyrometer (MIKRON M90-H)를 사용하였다. 그림 2는 ICB 장치의 전위배열의 개략도이다. 기관으로는 glass를 사용하였으며, 표면의 오염물질을 제거하고 계면 접촉력을 향상시키기 위한 세척을 하였다. 특히 glass 기관 사용 시에 문제가 되고 있는, 고온에서의 glass 내부에서 계면으로 확

산되어 나오는 alkali ion들로 인한 문제[16]를 방지하기 위해 세척과정의 마지막 단계에 질산(HNO₃)으로 세척하고 증류수로 헹구어 낸 뒤 loading하였다.

본 실험에서는 ITO 박막이 갖추어야 할 가장 중요하고도 필수적인 두 가지 요소 즉, 가시광선 영역에서의 높은 투과성과 낮은 면적저항 (sheet resistance)에 의한 우수한 전기 전도도를 갖춘 박막을 얻기 위해 실험 조건을 다음과 같이 변화시켜 주었다. 온도 변화에 따른 박막의 성질 변화를 알아보기 위하여 기판온도를 상온에서 400°C 까지 변화시켰으며, indium crucible의 온도는 1100°C로 고정하였고 tin의 doping량 조절은 tin evaporator의 온도를 600~770°C 사이에서 변화시켜 가면서 조정하여 최적 온도를 XPS 조성비 분석을 통하여 구하였다. 가속 전압에 의한 효과를 보기 위해서는 가속 전압을 0~7 kV 영역에서 변화시켜 주었으며, 또한 oxygen concentration 변화에 따른 박막의 성질 변화를 조사하기 위하여 증착시 산소 분압을 $5.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-4}$ Torr 사이에서 변화시켜 주었다.

본 실험에서 증착된 박막의 조성비와 원자의 화학적 상태를 구하기 위해 XPS를 사용하였다. X-ray 원으로는 Al K- α line (1486.6 eV)을 사용하였다. XPS 분석을 위해, 박막표면의 오염원을 제거하기 위해 Ar⁺ 이온으로 1분간 sputter한 후 XPS를 측정하였다. 측정시 scan 속도를 wide scan의 경우 1 eV/sec, narrow scan인 경우 20 meV/sec로 하였고, In3d, Sn3d 그리고 O1s 에서 binding energy에 따른 peak들의 위치를 확인하였다.

본 실험에서 제작된 박막의 결정성은 X-ray diffraction으로 분석하였다. X-ray의 침투 깊이를 감소시키기 위해서는 X-ray의 입사각을 작은 각으로 고정시키는 Glancing angle X-ray Diffraction (GXRD) 방법이 이용된다. 본 연구에서는 X-ray원으로 Cu K- α ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) line을 사용하였고, 전자 가속전압 50 kV, 전자전류 60 mA의 조건에서 측정하였다. X-ray의 입사각은 0.2°였고 2 θ 는 20°부터 65°까지 0.03°간격으로 scanning 하였다.

본 실험을 통하여 만든 ITO 박막의 전기적 특성은, four-point-probe를 사용하여 sheet resistance (R_s)를 측정후 박막의 비저항을 계산해 보았으

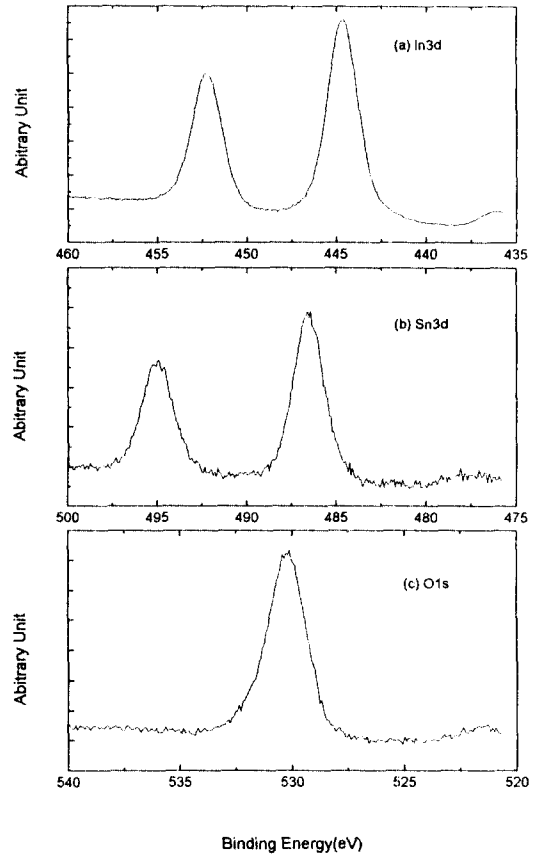


그림 3. ITO 박막의 XPS core level 스펙트럼.

며 또한 Hall effect를 조사하여 carrier mobility와 농도를 측정해 보았다. Carrier의 mobility를 얻기 위한 Hall effect 측정은 Van der Pauw 법을 이용한 장비를 가지고 조사하였다. 성장된 ITO 박막의 네 모서리에 indium을 붙인 후 Ar 분위기에서 420°C의 온도에서 2분간 열처리를 하여 ohmic contact을 하였다. 열처리한 시료의 indium 전극에 금선 (gold wire, 1.0 mil)을 연결하여 Hall effect를 측정하였는데 이때 걸여준 자기장은 3000 G 이다.

성장된 ITO박막의 광 투과성을 조사하기 위하여 다파장 동시측정분광장치(OMA: Optical Multichannel Analyzer)를 사용하였다. 가시광선 영역에서의 투과율을 측정하기 위하여 광원으로는 halogen lamp를 사용하였고 검출기는 photodiode를 통하여 측정하였다. 가시광선 영역에서 파장의 변화에 따른 투과율의 변화를 관찰하기 위해

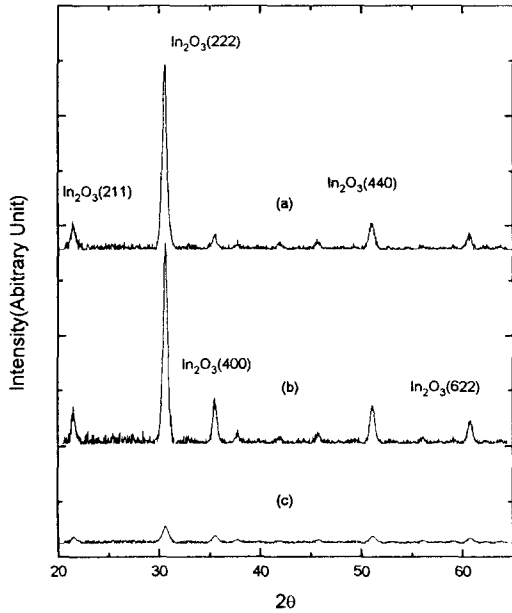


그림 4. 가속전압과 기판온도의 변화에 따른 XRD 스펙트럼의 변화. (a)가속전압 5 kV, 기판온도 350°C (b)가속전압 0 kV 기판온도 350°C (c)가속전압 0 kV, 기판온도 R.T. 에서 제작된 ITO 박막의 XRD 스펙트럼.

monochrometer를 이용하여 파장의 변화에 따른 투과된 빛의 세기를 측정하였다.

3. 결과 및 분석

그림 3은 가속 전압 3 kV, 이온화 전류 100 mA 에서 제작된 ITO 박막의 XPS spectrum이다. 그림 3(a)는 In 3d peak로서 spin-orbit coupling에 의하여 peak가 3d_{5/2} 와 3d_{3/2} 두개로 갈라짐을 보여주고 있다. In 3d_{5/2}의 경우 peak의 위치가 450.0 eV에서 나타나게 되는데 이는 금속 상태에서의 결합에너지(443.9 eV)[17] 보다 1.1 eV 큰 것이다. 이는 ITO 박막 내 In이 산소와 결합하여 In₂O₃ 상태로

존재하기 때문이라 생각되어진다. 그림 3(b)는 Sn의 3d_{5/2}(486.6 eV) core level의 스펙트럼으로 Sn의 metal 상태(485.2 eV)[17]보다 1.4 eV 큰 값으로 나타난다. 이 결과로 볼 때 Sn도 SnO₂ 형태로 결합되어 있음을 알 수 있다. 그림 3(c)는 O1s peak로서 주 peak의 위치가 530.3 eV에서 나타나는데 atomic oxygen의 peak 위치가 532.4 eV 보다 2 V 정도 낮은 위치에서 나타남을 알 수 있다. 이것은 oxygen이 박막 내에서 atomic oxygen 형태가 아니라 oxide 형태로 결합되어 있음을 나타낸다. 위의 사실들을 미루어 볼 때 ITO막은 In과 Sn이 화학적으로 산소와 결합한 상태로 있음을 알 수 있었고 In과 Sn이 결합하여 금속간 화합물을 형성하지는 않았음을 알 수 있다.

그림 4는 ICBD로 증착한 ITO박막의 XRD spectrum이다. 그림 4(a)는 가속전압 5 kV에서 기판 온도를 350°C로 가열한 경우이고, 그림 4(b)는 가속전압 0 kV 기판온도를 가열하지 않은 경우 XRD spectrum 이고 그림 4(c)는 가속전압 0 kV에서 기판온도를 350°C로 했을 때의 XRD spectrum이다. 일반적으로 ITO 박막을 상온에서 제작할 경우 그림 4(b)와 같이 비정질을 띠게 된다. 기판온도를 가열하고 증착 시킬 경우 결정성이 나타나게 되는데, 표 1은 가속전압 3 kV에서 기판온도를 바꾸어 가며 측정하였을 경우 나타나는 ITO 박막의 각 반사 면에 대한 peak 의 비를 나타낸다. 이때 In₂O₃(222)면에 의해 반사되는 peak(2θ = 30.59)의 강도를 100으로 보고 규격화시킨 상대 peak의 세기이다. 기판온도가 200°C 이상이 되면 결정화가 시작되면서 기판 온도의 증가에 따라 다른 부 peak의 크기가 감소함을 알 수 있었다. 그림 4(a), (c)의 경우 기판온도는 동일하게 350°C로 유지시키고 가속전압을 5 kV로 하였을 경우에는 그림 4(c)에 나타나는 부 peak (In₂O₃(440))의 크기가 현

표 1. ICBD법으로 제작된 ITO박막의 기판온도 변화에 따른 상대 회절강도의 변화

결정면 \ 기판온도	200°C	300°C	400°C
(211)	11.3	10.3	5.7
(222)	100	100	100
(400)	19.4	11.8	0.77
(444)	16.1	11.8	8.1
(622)	9.6	8.8	7.7

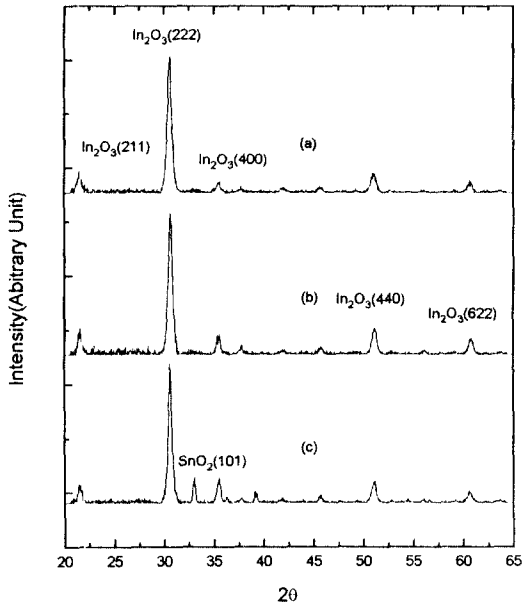


그림 5. Tin 농도의 변화에 따른 ITO 박막의 XRD 스펙트럼의 변화. Tin의 함량이 각각 (a) 2.5 at. % (b) 5.3 at. % (c) 14.5 at. % 일때의 XRD 스펙트럼의 변화.

저히 감소함을 알 수 있었다. 즉 가속전압에 의하여 결정성이 더욱 향상되었음을 볼 수 있었다. 이것은 가속전압에 의한 효과가 증착시 surface migration energy로 바뀌면서 원자들이 가장 안정한 배열이 (222)면의 결정형태로 찾아가기 때문으로 생각되어진다. 그림 5는 ITO 박막 내에 있는 tin의 원자농도의 변화에 따른 결정성의 변화를 나타낸 그림이다. 그림 5에서 보면 tin의 원자농도가 14% 정도가 될 때까지는 In₂O₃의 상외에 다른 상이 나타나지 않으나 tin의 원자농도가 14.5% 이상이면 SnO₂의 상이 나타남을 볼 수 있다. 그러나 XPS의 결과에서와 마찬가지로 In과 Sn이 O과 결합한 산화화합물 형태는 관측되지 않았고 이것은 tin의 원자농도가 40%에 도달할 때까지도 관측되지 않았다.

ITO 박막의 전기적 특성은 기판 온도와 산소 분압에 의해 많은 영향을 받게 된다. 기판 온도가 높게 되면 원자 재배열에 의해 결정성이 향상되고, 이때 빈자리가 메워지므로, grain size는 증가하고 전하 농도는 줄어들지만 반대로 전하 이동도는 증가하게 된다. 따라서 박막의 전기저항은 감소하게 되는 것이다. 이때에 한가지 조건은 충분한 In₂O₃

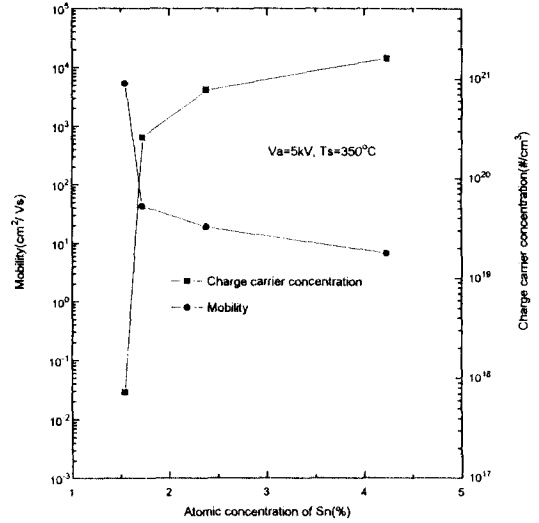


그림 6. Tin 농도의 변화에 따른 ITO 박막의 면 저항의 변화.

와 SnO₂가 이루어질 수 있는 만큼의 적절한 산소가 필요하게 된다. 이러한 산소 분압이나 기판 온도에 관한 영향 등은 비교적 많이 알려져있다. 그러나 tin의 doping양 또한 전기 전도도에 영향을 주는 것으로 알려져 있다[4]. 본 연구에서는 tin doping 양에 따른 전기적 특성과 결부된 결정성과의 관계에 대한 결과를 고찰해 보았다. 그림 6은 가속전압 5 kV, 기판온도 350°C에서 제작된 ITO 박막의 전기 전도도의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 보면 전기전도도가 tin의 원자농도에 크게 의존함을 알 수 있다. ITO 박막의 전기 전도도는 doping 되어진 tin이 In₂O₃ 박막 내에서 indium이 있어야 할 자리에 In³⁺대신 Sn⁴⁺로 치환되어 tin은 하나의 양공을 발생하게 되고, 이 양공이 전하 운반자의 역할을 하게 되어 나타나게 된다. 따라서 ITO 박막 내의 tin 양의 증가는 전하운반자의 양을 증가시켜 저항을 감소시킨다. 따라서 그림 6에서 보이듯이 처음 전기 전도도의 증가는 tin의 증가로 인한 전하운반자의 증가로 설명할 수 있다. 그러나 tin의 양이 대략 4% 이상이 되면 전기 전도도가 급격히 감소하는데, 이는 막내에 tin의 증가로 인하여 전하운반자의 수는 증가하지만 그림 7에서 볼 수 있듯이 전하이동도의 감소로 인하여 결과적으로는 전기 전도도의 감소를 초래하게 된다. 이러한 전하이동도의 감소는 ITO 박막 내에

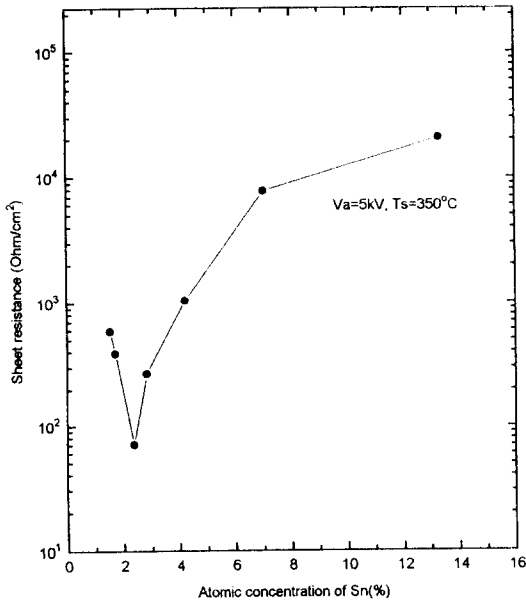


그림 7. Tin 농도의 변화에 따른 ITO 박막내의 전하 운반자와 전하 이동도의 변화.

tin의 양이 증가할 경우 $In^{3+}(0.80\text{\AA})$ 과 $Sn^{4+}(0.69\text{\AA})$ 의 이온반경의 차이로 인해 disordered된 상태가 증가하게 되어 전하이동도의 감소를 가져오는 것으로 생각되어진다. 이러한 tin의 농도변화에 따른 전기전도도의 변화는 진공 증착 방법을 이용하여 제작한 경우에도 보고되고 있는데 T. Nagatomo의 결과[4]에 의하면 tin의 양이 12%에서 최소로 나타나고 있다. 그러나 이 경우 12%는 tin 자체의 양이 아니라 $SnO_2:In_2O_3$ 의 비가 12:88인 경우로 생각되어진다. 따라서 본 실험에서 얻은 tin의 농도를 $SnO_2:In_2O_3$ 의 비율로 계산하면 12:88로 Nagatomo의 결과와 일치한다. 그러나 tin의 doping 양에 따른 전하 농도나 전하 이동도의 변화는 약간 다르게 나타났다.

그림 8은 가속전압 3 kV 이온화 전류 100 mA에서 제작된 ITO 박막의 파장과 온도에 변화에 따른 투과율의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 가시광선 영역에서의 투과율은 증착시 기판 온도 따라서 증가하고 있다. 일반적으로 금속 산화물의 경우 대부분 유전체적 성질을 띠게 되는데, 이때 흡수 계수는 유전체내에 금속 상태로 남아있는 원자의 영향을 받게 된다. 따라서 위의 결과는 ITO 박막 내에 있는 Indium이나 tin의 온도

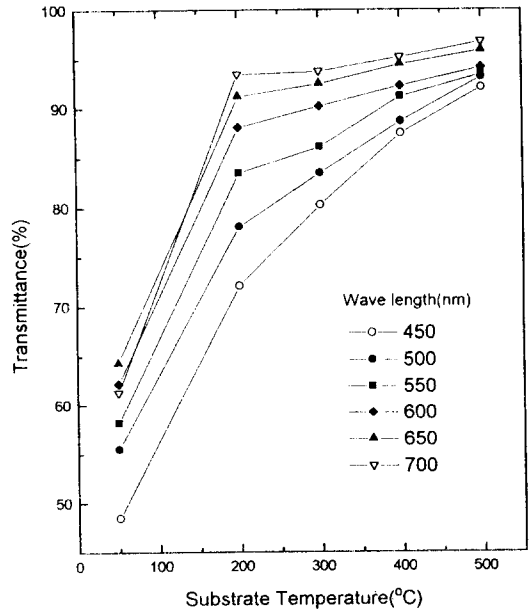


그림 8. 기판온도와 파장에 따른 광투과율의 변화.

가 증가할 경우 산소와 활발히 반응하여 산화물로 변화되기 때문이며 이는 XPS의 결과와 일치한다. 본 실험에 의하면 기판온도가 300°C 이상에서 광 투과율이 급격히 상승되는 것을 관찰할 수 있었으며 90%이상의 광 투과율을 가지는 ITO 박막을 얻을 수 있었다.

4. 결 론

본 실험에서는 reactive-ICBD 방법을 이용하여 glass 기판 위에 기판온도 350°C를 유지하며 oxygen 분위기에서 indium을 증착하고, 동시에 tin을 thermal evaporation 방법을 사용하여 45°입사각으로 doping시켰다. 이렇게 제작한 ITO 박막의 두께는 500 Å으로 모든 시료에 대하여 균일하게 하였다. 성장된 박막의 조성 및 상태를 알아보기 위하여 사용한 XPS spectrum에서 결합 에너지 차이를 조사해본 결과 indium과 tin이 oxygen과 결합한 In_2O_3 와 SnO_2 형태로 막 내에 존재하고 있다는 것을 확인할 수 있었고, XPS와 GXRD의 결과를 통해서는 박막내의 tin 함유량이 14%를 넘게 되면, 주 peak인 $In_2O_3(222)$ 면 이외에 다른 부 peak들과 함께 SnO_2 peak까지 확인되는 것으로 보아 어느

정도까지의 tin-doping은 박막의 전기적 성질을 향상시키기는 하지만 그 이상의 양이 doping 되면 결정성 향상에는 저해요소가 됨을 알 수 있었다. 또한 박막의 전기적 특성 조사를 통해서 doping되어진 tin의 함유량이 4 at% 정도가 될 때 박막의 전기적 성질이 가장 좋은 결과를 얻었다. 가장 우수한 성질을 나타내는 시료의 경우, 광 투과율이 90% 이상, 비저항 $\rho = 3.55 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$, mobility $\mu = 42.8 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$, 전하 농도가 $n = 7.5E + 20 \text{ cm}^{-3}$ 인 박막을 얻었다.

감사의 글

본 연구는 과학재단의 협력연구과제와 삼성전자(주)와의 산학연구과제의 일환으로 수행되었으며 전기전도도 측정에 많은 도움을 주신 목원대학교 윤희중 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. K.L. Chopra, S. Major and D.K. Pandya, *Thin Solid Films*, **102**, 1(1983).
2. J.C.C. Fan, F.J. Bachner and G.H. Foley, *Appl. Phys. Lett.*, **31**, 773(1977).
3. T. Nakane, H. Masuta and Y. Honda, *Nucl. Instrum. Methods*. **B59**, 264(1991).
4. T. Nagatomo, Y. Maruta and O. Omoto, *Thin Solid Films*, **192**, 17(1990).
5. T. Karasawa, Y. Miyata, *Thin Solid Films*, **223**, 135(1993).
6. W.K. Lee, T. Machino and T. Sugihara, *Thin Solid Films*, **224**, 105(1993).
7. L.A. Ryabova, V.S. Slun and I.A. Servinov, *Thin Solid Films*, **92**, 327(1982).
8. H. Kobayashi, T. Ishida, K. Nakamura, Y. Nakato and H. Tsubomura, *J. Appl. Phys.*, **72**(11), 5288(1992).
9. H.J. Krokoszinski and R. Oesterlein, *Thin Solid Films*, **187**, 179(1990).
10. J.E. Morris, M.I. Ridge, C.A. Bishop and R.P. Howson, *J. Appl. Phys.*, **51**, 1847(1980).
11. T. Takagi, I. Yamada, A. Sasaki, *J. Vac. Sci. Technol.*, **12**(6), 1128(1975).
12. I. Yamada, *Proc. int'l Ion Engineering Congress - ISLAT'83 & IPAT'83*, Kyoto, 1177(1983).
13. K.W. Kim, S.C. Choi, S.S. Kim, S.J. Cho and C.N. Whang, *J. Mater. Sci.*, **28**, 1537(1993).
14. S.J. Cho, H.S. Choe, S.C. Choi, K.W. Kim, H.K. Jang, S.S. Kim, C.N. Whang, *Nucl. Instrum. Method*, **B59/60**, 1245(1991).
15. K.W. Kim, C.E. Hong, S.C. Choi, S.J. Cho, C.N. Whang, T.E. Shim, D.H. Lee, *J. Vac. Sci. & Technol.*, **A12**, 3180(1994).
16. H. Kenko, and K. Miyake, *J. Appl. Phys.*, **53**, 3629(1982).
17. C.D. Wagner, W.M. Riggs, L.E. Davis, J.F. Moulder, G.E. Mullenberg, "Handbook of X-ray photoelectron spectroscopy" (Perkin-Elmer Corporation, 1979).