

기술 특 집

디스플레이용 투명전극의 현황 및 전망

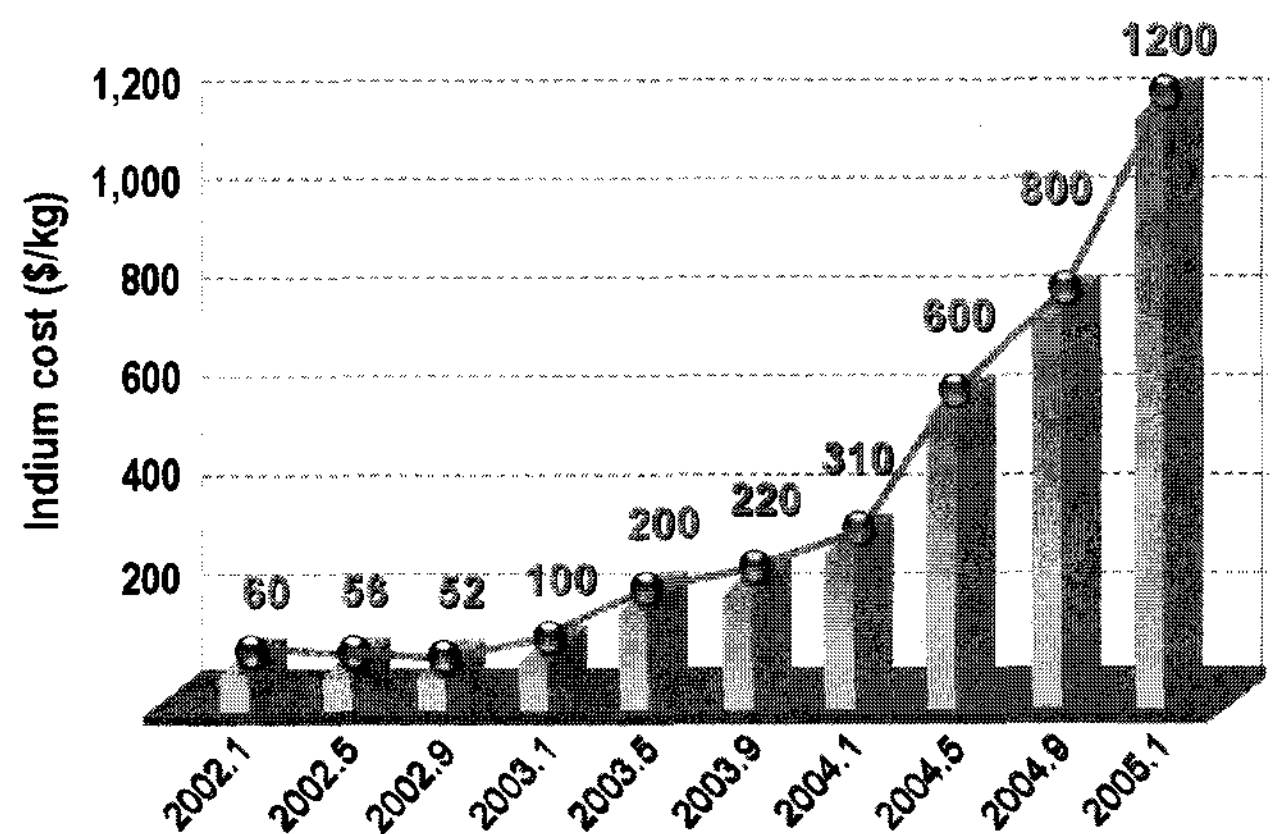
이준형, 김정주 (경북대학교 신소재공학부)

I. 서 론

산화물계 투명전극 (transparent conducting oxide: TCO) 은 정부가 국가 역량을 집중하여 기술개발 및 관련 산업발전을 효율적으로 극대화하기 위하여 선정한 차세대 성장동력산업 분야 중 디스플레이, 디지털 TV, 차세대 이동통신, 지능형 홈 네트워크 등과 직접적인 관계를 가지고 있어 중, 장기 우리나라의 산업발전에 없어서는 안될 고부가가치를 실현하는 필수불가결한 소재이다. 현재 국내 디스플레이 관련 기술은 이미 세계 최고의 수준을 자랑하고 있으며 이에 따라 관련산업은 괄목할만한 성장을 이끌어 왔다.

대표적인 산화물계 투명전도체 소재로는 In_2O_3 , SnO_2 , ZnO 를 들 수 있다. 이들은 모두 전자가 carrier로 작용되는 dopant들을 고농도로 doping하여 n형 반도체를 지닌 투명전도체로 응용하고 있다. 현재 n-type 투명전극 재료로는 In_2O_3 에 약 10wt%의 SnO_2 가 첨가된 Indium Tin Oxide (ITO)가 널리 상용화 되어 사용되고 있는데 이것은 ITO가 유리기판에 박막으로 증착 되었을 경우 $10^3 \Omega \text{cm}$ 이상으로 전기전도도가 높을 뿐만 아니라 가시광선 투과도 역시 90%에 근접할 정도로 높기 때문이다.^{1),2)} 그러나 아연과 함께 산출되는 인듐의 존재량은 지각에 존재하는 철의 1ppm 정도로 매우 희소하기 때문에 향후 10년내 전 세계적인 인듐 자원의 고갈이 예상되는 데에 따른 원료수급이 불안정하여 최근 인듐의 가격이 급등하고 있다([그림 1] 참조). 이러한 현상으로 인하여 현재 세계 1위의 기술력을 바탕으로 막대한 수출의 원동력이 되고 있는 국내 디스플레이 산업이 위축되거나 않을까 우려되고 있다. 따라서 현재 ITO를 대체할 수 있는 혹은 인듐의 함량을 줄일 수 있는 TCO 개발에 관심이 집중되고 있다.

현재 지속적으로 개발되어지고 있는 device들이 보다 큰 주사속도, 더 큰 스크린 크기 그리고 보다 빠른 그래픽이 요구되는 추세를 감안하면 투명성이 유지되는 동안 저항을 감소시킬 것이 요구되기에 기존 재료들은 그 요구를 만족시키기 어렵게 될 것이라는 전망과 함께 보다 우수한 물성을 지닌 새로운 type의 투명전도체 개발을 요구하고 있다. 특히



[그림 1] 인듐메탈의 연도별 가격변동추이

우수한 물성의 p-type 산화물계 투명전도체가 개발된다면 기존의 n-type 산화물계 투명전도체만을 이용한 응용분야를 더욱 다양화할 것으로 기대되어 최근에는 p-type 산화물 투명전도체의 개발에도 연구자들은 많은 관심을 기울이고 있다. p-type 전도체가 개발되면 n-type 투명전도체와 p-n 접합을 이루어 다양한 기능의 투명디스플레이, 투명발광소자 등의 광전자 소자를 구현하여 경제적 측면 및 산업의 다각화에도 크게 기여할 수 있을 뿐만 아니라 대체에너지 중의 하나인 태양전지를 여러 개의 p-n 접합을 적층한 multi-junction 구조로 제조함으로써 에너지 효율을 크게 높일 수 있는 장점이 있다. 나아가 LED에도 응용된다면 에너지 효율을 획기적으로 줄일 수 있어 경제적 및 환경적 파급효과는 매우 클 것으로 기대된다.

본지에서는 최근 디스플레이용 TCO로 각광받고 있는 소재들의 개발현황과 앞으로의 전망 등에 관하여 기술하고자 한다.

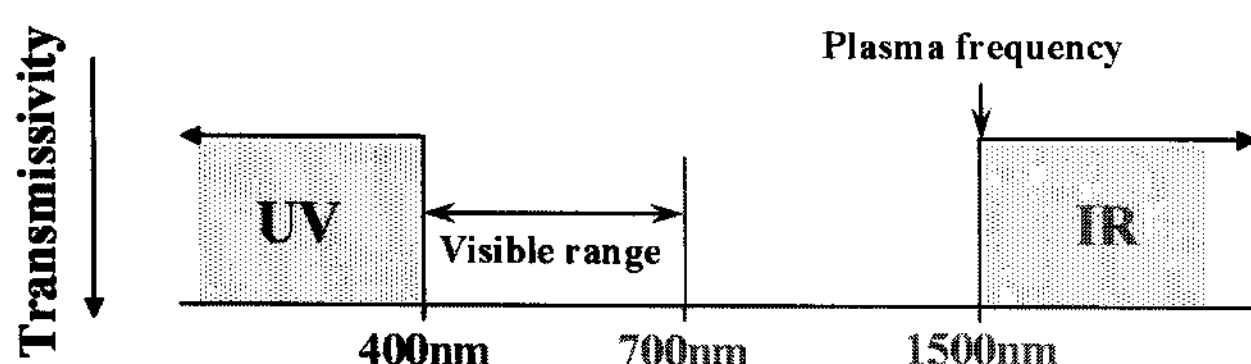
II. 투명전도체의 물리적 성질

TCO에서 요구되는 가장 중요한 물성으로는 투명성과 전

기전도성을 들 수 있는데 고체의 투명성과 전기전도성은 상반하는 성질이 있다. 물리적으로 투명성은 밴드갭이, 전도성은 carrier 농도 및 mobility가 좌우한다. 일반적으로 가시광선의 파장 범위는 약 400-750nm이며 이것을 에너지로 환산하면 약 3.11-1.8eV 정도에 해당한다. 따라서 육안으로 투명한 재료란 적어도 밴드갭이 3.11eV 이상이 되어야 한다는 것을 의미하는데 밴드갭은 재료를 구성하는 원소의 종류와 재료의 결정구조에 의존한다. 금속의 경우 carrier 농도는 거의 일정하여 전도성을 높이기 위해서는 mobility를 증가시킬 필요가 있는데 산화물계 반도체의 경우 dopant량에 의존하는 carrier의 농도뿐만 아니라 dopant scattering에 의한 carrier mobility 저하 역시 고려를 하여야 높은 도전성을 얻을 수 있다. 따라서 고투과성 및 고전도성은 소재 자체가 가지고 있는 고유한 특성 혹은 치환형 dopant의 도입을 통하여 넓은 에너지 밴드갭을 가지는 산화물을 선택함으로써 만족될 수 있다. 대부분의 유용한 산화물 재료는 넓은 밴드갭, 축퇴를 할 수 있는 능력, 적외선 영역에서 플라즈마 흡수단이 확실한 밴드형태를 가지는 n-type 전도체이다.

빛은 전자기파의 일종으로서 전자기파의 주파수가 고체 내 플라즈마 전자주파수와 일치할 때 cut-off 현상이 일어나 전자기파가 플라즈마를 통과하지 못하는 현상이 발생되고 이때의 주파수를 플라즈마 주파수라 한다.^[3] 즉, 플라즈마 주파수보다 낮은 주파수에 해당하는 파장의 빛은 자유전자를 가진 고체를 통과하지 못하고 반사 및 흡수하게 되어 결국 불투명하게 된다. 이때 플라즈마 주파수는 전자밀도의 제곱근에 비례하므로 TCO의 투명성과 전기전도성은 상반하게 되는 것이다.^[4] 대부분의 TCO 재료들의 경우 플라즈마 주파수는 IR 근처에 머물게 되어 가시영역은 이보다 훨씬 높은 주파수에 머물게 된다. 반대로 밴드갭보다 큰 에너지(높은 주파수)를 가진 UV 영역에서는 빛이 전자 여기에 사용됨(흡수)으로써 투과하지 못하게 된다. [그림 2]에 투과창의 범위를 나타내었는데 이 경우 투과창은 UV 밴드갭의 끝에서 IR 끝의 플라즈마 흡수 주파수까지 된다. 산화물이 축퇴되었을 때 carrier 농도의 증가는 Fermi level이 shift하는 Burstein-Moss 효과 때문에 밴드갭 확대를 야기하기도 한다.^[4]

TCO 소재의 양이온이 열린 d 궤도전자배치를 가질 경우 외부로부터의 빛에 의해 d-d 천이가 발생되어 강한 착색(coloration) 현상이 일어나기에 열린 d 궤도를 가진 천이 금속을 함유한 TCO 소재는 적절하지 못하며 닫힌 전자 배치($d^{10}s^0$)를 가진 원소들로 이루어질 것을 요구한다.^[5] 이러한 원소들로는 Ag^+ , Cd^{2+} , In^{3+} , Sn^{4+} , Sb^{5+} 가 있는데 대부



[그림 2] 파장에 따른 transmission window

분의 활용 가능한 TCO들은 이러한 원소들을 바탕으로 이성분계, 삼성분계 나아가서는 그 이상의 성분을 조합하여 구성 되어질 것으로 보면 무방할 것이다. 이러한 소재를 바탕으로 하여 TCO로서 요구되는 조건들은 물리적특성, 화학적, 열적 안정성, 증착가능온도, 전기전도성, 플라즈마 주파수, 일함수, 두께에 따른 균일성, 유독성, 가격 등의 여러 가지가 있으며, 이와 같은 다양한 조건들을 고려하여 최선의 전극소재가 선택된다고 할 수 있다. 이 외에도 Figure of merit^[6](전기전도도와 박막의 optical absorption coefficient의 비율로 정의)을 고려하기도 하는데 carrier의 mobility가 클수록 Figure of merit이 커지게 되므로 Figure of merit이 큰 TCO 소재일수록 더 나은 동작특성을 나타내게 된다. 따라서 박막내 여러 가지 scattering mechanism에 의한 mobility 저하가 중요한 요소로 작용하게 된다.

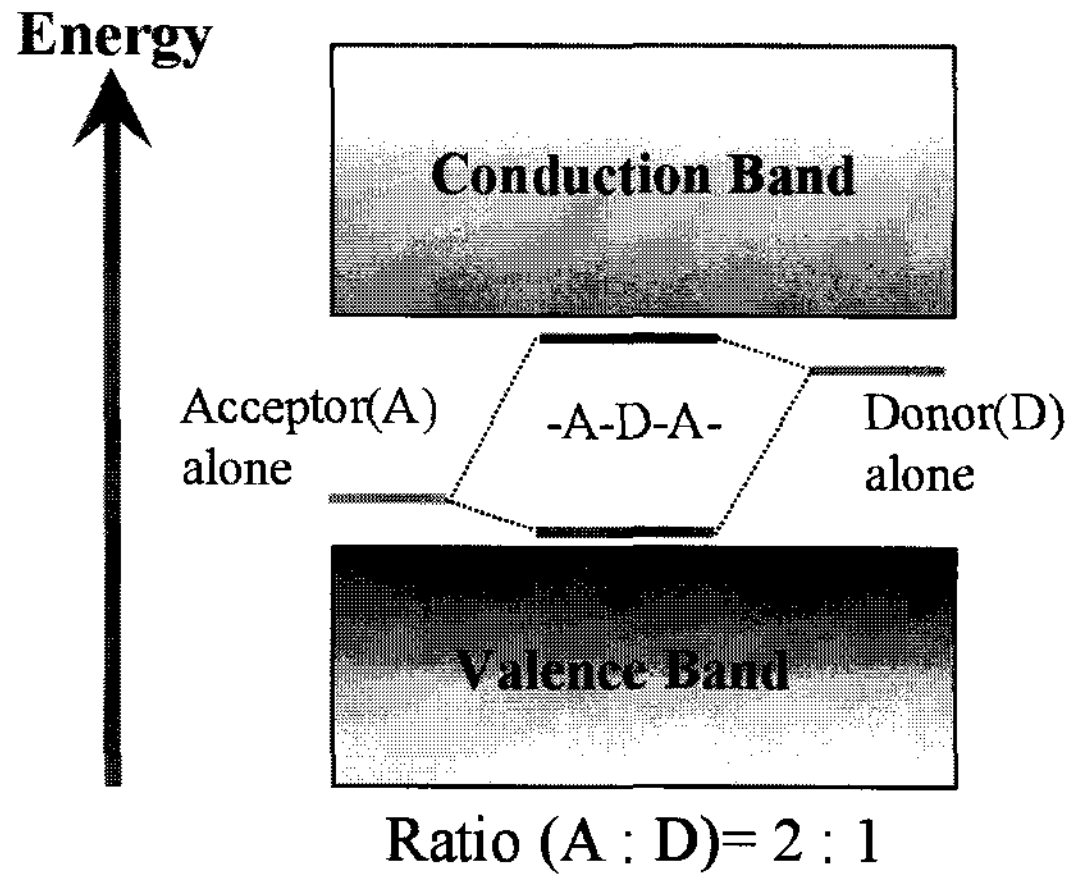
III. 연구개발현황

1. n-type 투명전도체

국내 display 산업은 기술적으로나 생산량적으로나 세계적인 수준에 도달해 있다. 이러한 산업적 우위에도 불구하고 투명전도체 분야의 기초소재 산업 및 기술은 매우 미약한 실정이다. 국내 대학 및 연구소에서 이루어진 대부분의 ITO 연구는 박막 제조공정 및 특성평가에 국한되어 왔으며 TCO 소재 자체에 대한 연구는 전무한 실정이라서 소재개발 및 타겟 제조에 관한 기술개발이 뒤따라야 할 것으로 생각된다.

근래 유리기판을 대신하여 플라스틱 기판 위에 TCO를 증착하여 터치패널과 전자 paper, 유기EL 등에 응용되고 있다. 다결정으로 결정화된 ITO 박막의 경우 이런 용도에는 적절치 못하여 10% 정도의 ZnO가 포함된 In_2O_3 계의 비결정질 박막이 사용되고 있다.^[7] 이 경우 ITO 박막에 필적하는 전기전도도를 보임으로써 새로운 조성개발에 따른 새로운 응용분야 적용이라는 점에서 좋은 예가 되겠다.

값비싼 ITO를 대체할 차세대 n-type 산화물계 투명전도체 개발에 대한 관심이 높아지고 있는 가운데 최근 Northwestern 대학의 Mason 그룹에서는 co-doping에 의한 SnO_2 의 고용영역을 확대함으로써 인듐 절약형 ITO 소재를 연구한 바 있다.^[8-10] In_2O_3 의 In^{3+} 자리에 Sn^{4+} 을 첨가(치환)할 경우 전자가 생성되어 In_2O_3 의 전기전도도는 증가하게 된다. 그러나 Sn의 첨가량이 증가할 경우 생성되는 전자를 보상하는 양이온 공공이 생성될 수 있으며 이로 인하여 Sn의 solubility는 제한되고 전기적 물성도 저하될 수 있다. 이러한 경우 Sn^{4+} 와 Zn^{2+} 를 co-doping함으로써 고용범위를 40%까지 확대시킬 수 있다고 보고되고 있으며 본 연구팀의 실험에서도 가능성을 확인하였다.^[11] 이것은 co-doping을 할 경우 격자 에너지를 낮출 뿐만 아니라 acceptor의 에너지 레벨을 낮추고 일함수를 조절할 수 있는 효과도 있어^[12] 재료의 물리적 성질을 조절할 수 있는 특징이 있다. 이러한 사실을 바탕으로 co-doping에서 고용량에 영향을

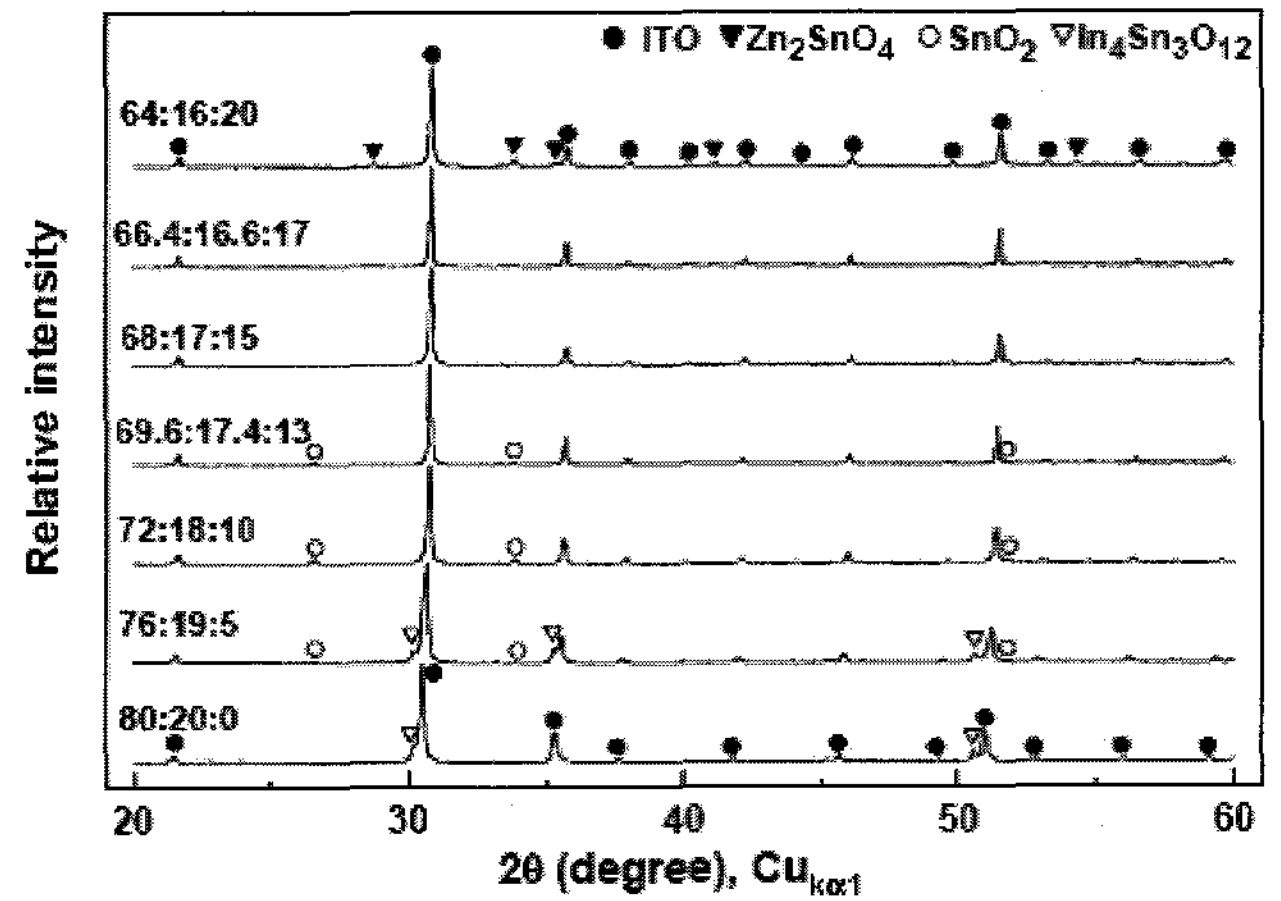


[그림 3] Co-doping에 의해 생성된 acceptor-donor-acceptor complexes에 의해 acceptor (A) level은 감소하였으며 donor (D) level은 증가하였다.^[12]

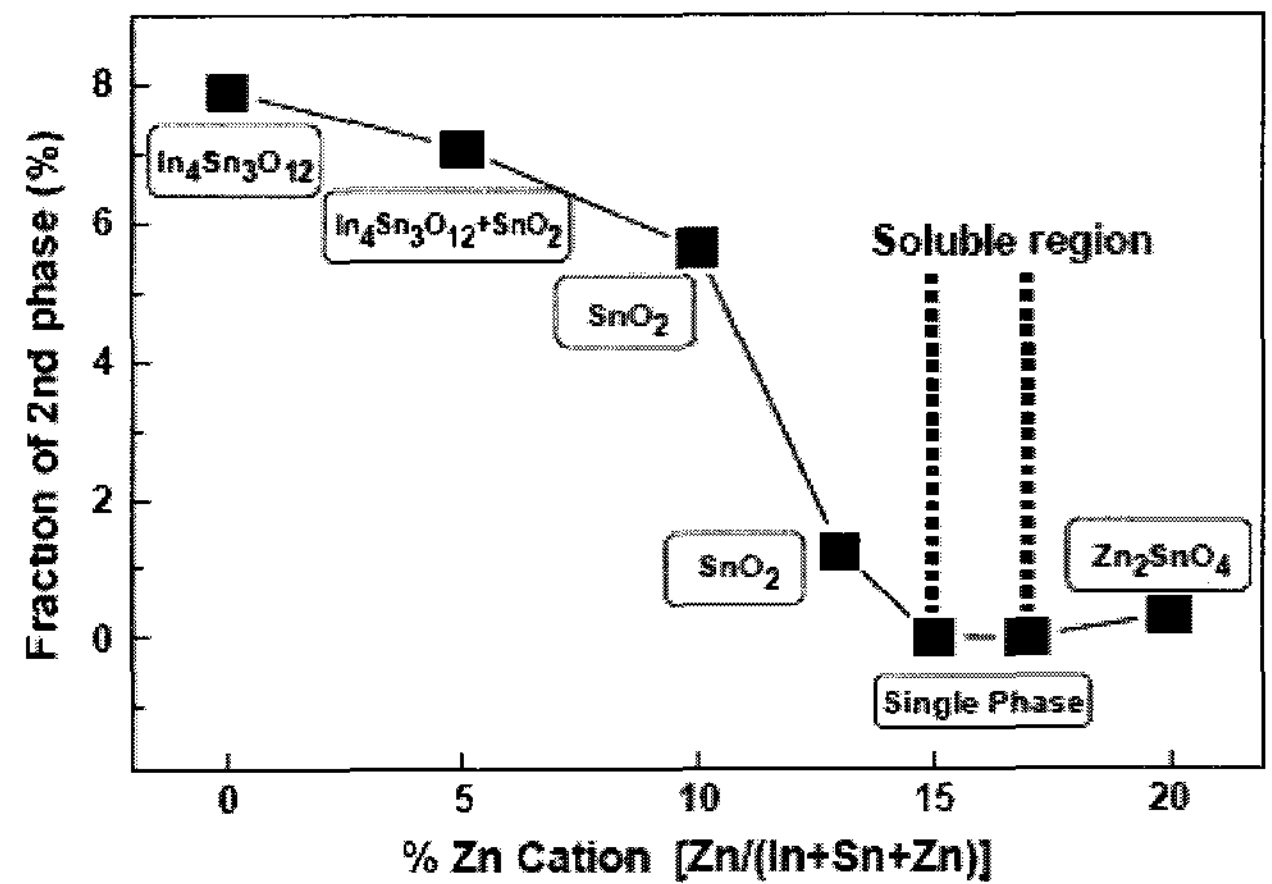
주는 원자가 및 이온반경을 고려하여 인듐 절약형 n-type 투명전도체를 개발할 수 있을 것으로 생각된다. 아직 ITO에 상응하는 투과율 및 전기적 특성의 달성이라는 숙제가 남아 있으나, 고용영역의 확대를 통하여 In₂O₃의 사용량을 30% 이상 현저히 감소시킴으로써 ITO를 대체할 조성으로의 가능성이 충분하다고 할 수 있다.

[그림 4] (a)에는 In₂O₃에 Sn과 Zn의 co-doping 효과를 조사하기 위하여, In³⁺과 Sn⁴⁺의 비율을 4:1로 고정하고 Zn²⁺의 량을 0-20at.%까지 변화한 후 1500°C에서 4시간 산소분위기에서 소결한 시편의 X-ray 회절분석결과를 나타내었으며, [그림 4] (b)에는 Zn함량에 따른 시편 내의 second phase 함량변화를 나타내었다. 그림에서 나타내었듯이 Zn이 첨가되지 않을 경우 Sn의 함량은 20at%를 차지하여 약 8at.%인 고용한계를 넘어서기에 In₄Sn₃O₁₂ second phase가 다량 생성되어 있다. Zn 첨가량이 증가함에 따라 In₄Sn₃O₁₂상 및 미반응 SnO₂의 량이 점차 감소하여 마침내 Zn의 함량과 Sn의 함량비가 약 1:1이 될 때 second phase 없이 단일상으로 존재하는 것으로 나타났다. 이 경우 고용된 Sn과 Zn의 합은 30at% 이상임을 알 수 있다. In₂O₃에 대한 ZnO 및 SnO₂의 고용범위는 각각 2at% 미만 및 8at% 정도인 것을 고려할 때 1:1 co-doping함으로써 고용범위가 획기적으로 늘어난 것을 확인할 수 있다. [그림 5]에 나타난 Zn 첨가량에 따른 격자상수의 선형적인 감소는 Sn⁴⁺ (0.069nm)와 Zn²⁺ (0.074nm) 이온이 In₂O₃의 In³⁺ (0.080nm) 자리에 치환되어 고용됨을 증명한다.

[그림 6]에는 Zn 첨가량에 따른 전기적 특성을 나타내었다. 전기전도도와 mobility는 Zn 첨가량이 15at%까지 증가하여 단일상이 되는 시점까지 증가하며 이후에는 다시 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 Zn 첨가에 따른 second phase의 함량과 밀접한 관계가 있다고 생각된다. 즉, Zn의 첨가량이 15at.%까지 증가되어 In₄Sn₃O₁₂ second phase가 감소되면 second phase에 의한 전자의 scattering이 감소되어 mobility가 증가하게 되고 이로써 전도도가 증가된 것으로 생각된다. 고용한계 이상인 20at.%의 Zn가 첨가되면

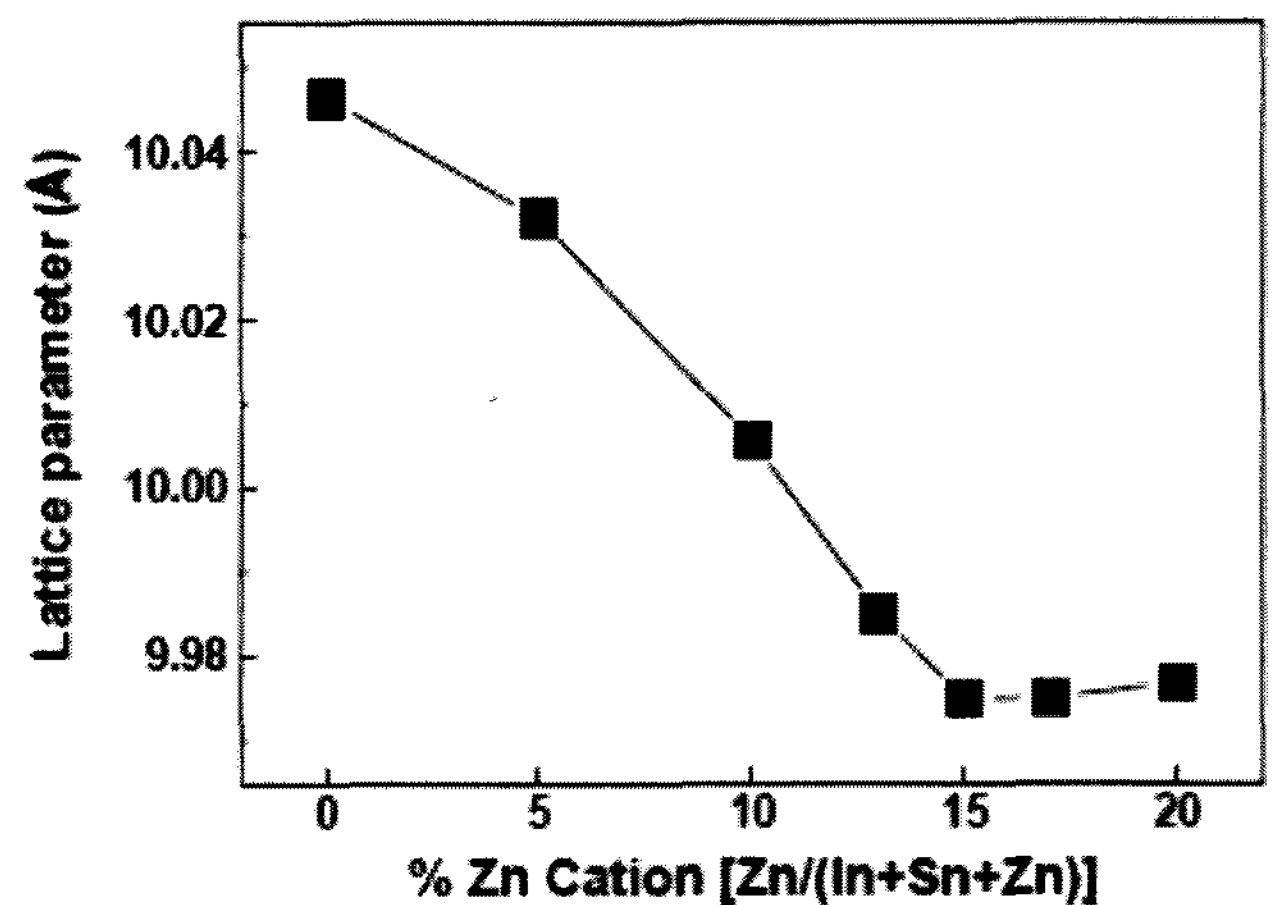


(a)



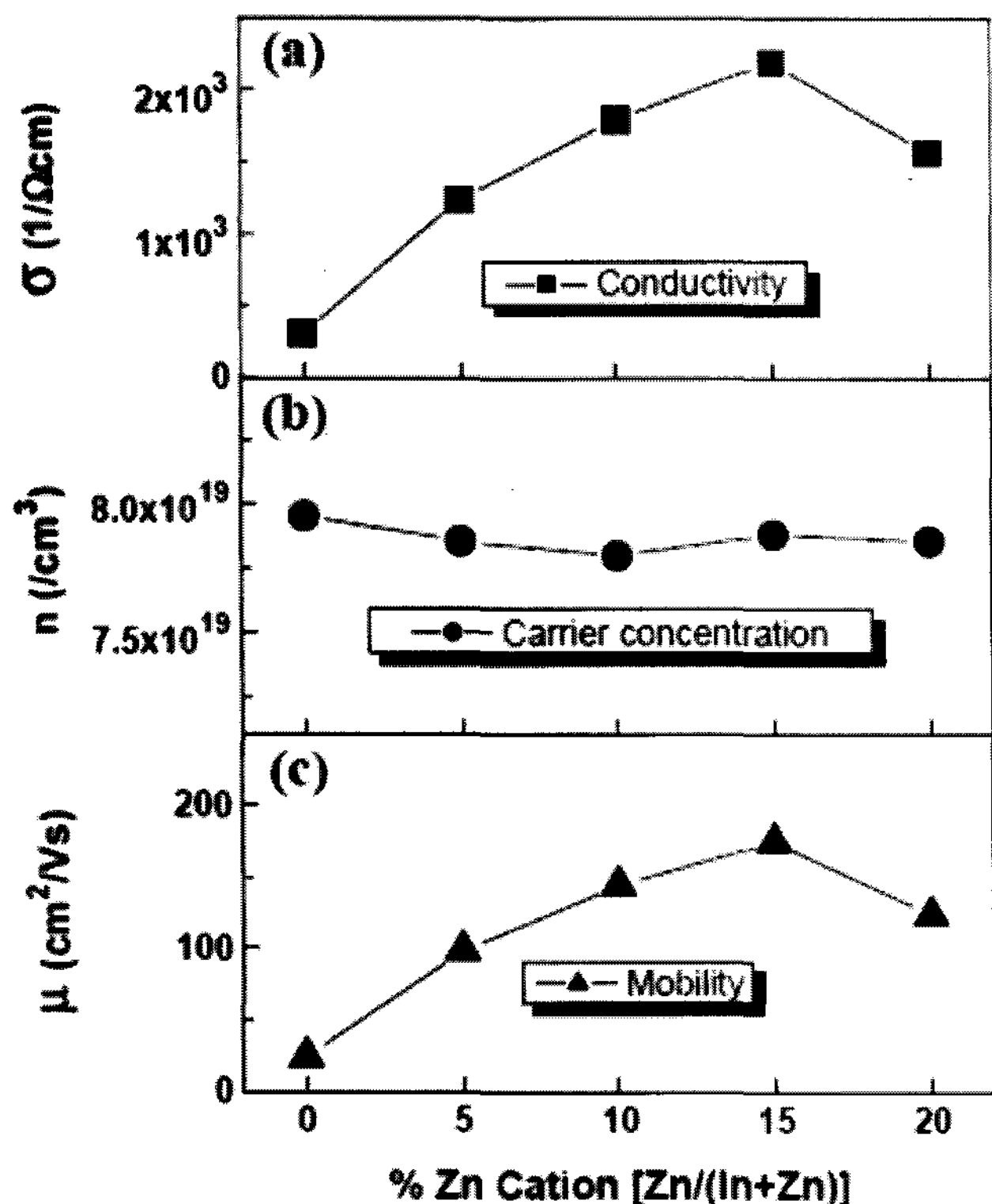
(b)

[그림 4] (a) Zn함량에 따른 시편의 X-ray 회절분석결과 (b) Zn함량에 따른 시편 내의 second phase 함량변화^[11]



[그림 5] Zn함량에 따른 시편의 격자상수 변화^[11]

Zn₂SnO₄ second phase가 생성되어 전자 mobility를 떨어뜨려 전도도가 감소한 것으로 생각된다. 한편 carrier con-



[그림 6] Zn함량에 따른 시편의 (a) conductivity, (b) carrier concentration, (c) mobility 변화^[11]

centration은 거의 일정한 값을 나타내었는데 이것은 Zn가 Sn이 함유된 In₂O₃에 co-doping됨에 따른 carrier 농도 감소 효과와 second phase 감소에 따른 전도성 In₂O₃상의 부피 증가에 따른 효과가 상쇄되어 거의 일정한 값을 나타내는 것으로 생각된다.

인듐의 사용량을 대폭 줄일 수 있는 layer structure를 가진 (In₂O₃)_k(ZnO)_l 역시 유망한 n-type 후보물질중의 하나이다.^[13] 본 연구팀의 실험 결과에서 In₂O₃의 ZnO에 대한 고용범위는 2% 이내로 매우 좁은 것을 밝혔으나^[14] 30-40%의 ZnO를 첨가시킨 indium zinc oxide (IZO) 조성에서 우수한 전기전도 특성을 나타냄이 보고된 바 있다. 여기에 co-doping으로써 SnO₂을 첨가한 ZnO-In₂O₃-SnO₂계 삼성분계를 고려한다면 전하보상에 의해 고용범위의 확대를 꾀할 수 있으리라 예상된다. 이 외에도 ZnO-In₂O₃-Ga₂O₃, Ga₂O₃-In₂O₃-SnO₂, CdO-In₂O₃-SnO₂, CdO-In₂O₃-SnO₂ 등의 삼성분계 화합물에 대한 연구가 최근 미국과 일본 등지에서 이루어지고 있다.

인듐을 전혀 포함하지 않는 새로운 조성개발에 관한 연구도 진행중에 있으며, 이들은 d 궤도의 전자가 가득 찬 Zn²⁺, Cd²⁺, Ga³⁺, Sb⁵⁺, Sn⁴⁺의 조합으로 구성될 것으로 생각된다. 그러나 최근 TiO₂에 Nb를 doping함으로써 우수한 n-type 전기전도도 특성이 나타나지만 투광도가 다소 떨어지는 것으로 보고 됨으로써 TiO₂의 새로운 응용분야에 대한 연구도 진행중에 있다.^[15] 이 외에 [Ca₂₄Al₂₈O₆₄]⁴⁺(4e⁻)이라는 inorganic electride가 있으며, 현재 투명전도체 재료로서의 응용 연구 중에 있다.^[16]

2. p-type 투명전도체

p-type 투명전도체 연구는 일본 동경공대의 Hosono 그룹이 활발한 연구를 진행하고 있으며 미국의 NREL(National Renewable Energy Laboratory)에서는 Northwestern 대학의 Mason 그룹과 p-type 및 n-type 소재에 관한 공동연구를 하고 있다. 여기서 일본은 주로 display 응용에 초점을 두고 있는 반면 미국은 태양전지로의 응용에 더 큰 비중을 두고 있는 것이 특징이다.

최근 연구 개발중인 대표적인 p-type 산화물계 투명전도체로서는 Delafossite 구조를 가진 CuAlO₂^[16,17], CuGaO₂^[18], SrCuO₂^[19,20] 등이 있으며, 이들의 전기적 특성은 비저항이 1~20 Ωcm, carrier density는 10¹⁷cm⁻³ 정도로^[21] n-type 투명전도체의 전기적 특성보다 훨씬 못 미치는 수준에 있다. 최근에 발표된 논문^[22,23]에서도 그 특성이 크게 향상되지 않고 있는 수준이다. p-type 산화물계 투명전도체의 hole 농도를 높이기 위하여 p-type dopant를 첨가할 경우 이들은 대부분 deep acceptor level을 형성하거나 hole 전하를 보상하는 defect를 생성시켜 첨가의 효과를 상쇄시키는 경우가 많다. 또 Madelung 에너지로 인한 dopant의 고용도가 낮아 second phase를 종종 생성하는 문제점이 있다. 이들 p형 전도체의 대부분은 합성조건이 매우 까다로와 단일상을 얻기 매우 힘든 것으로 알려져 있을 뿐만 아니라 sputtering 방법으로는 성막에 어려움이 있어 PLD 방법을 이용하여 박막을 증착하고 있다. Dopant의 종류를 바꿈으로써 n-type 및 p-type(양극성)을 모두 가질수 있는 TCO로는 CuInO₂가 있다.^[24]

p-type TCO에 있어 최근의 새로운 진전으로는 투명 ZnO의 실현을 들 수 있다. ZnO에 N 혹은 P₂O₅ 등을 doping함으로써 p-type 전기전도특성을 나타내는 것으로 보고되고 있다.^[25,26] 이 경우 n-type 및 p-type ZnO를 이용하여 p-n homo junction을 이룰 경우 LED 소자로의 응용가능성을 높일 수 있으며 약 380nm 부근의 자외선을 발생시키는 것으로 알려져 있다. p- 혹은 n-type 소재의 band gap은 소자의 전기 광학적 특성에 매우 중요한 변수로 작용할 것으로 생각되는바 doping을 통한 band gap 조절에 관한 연구도 뒤따라야 할 것으로 생각된다. TCO의 p-type화는 반도체로의 응용 가능성을 넓힐 수 있어 가장 큰 관심거리임에 틀림 없으며 여러 가지 광전자 소자의 개발을 예견할 수 있어 현재 많은 연구가 이루어지고 있으나 p-type ZnO의 개발은 연구단계에서 이루어지고 있으며 아직 안정적인 물성 확보는 어려운 실정이다.

한편 태양전지의 변환효율을 높이기 위하여 초기의 실리콘계 태양전지보다 효율이 높고 초기 열화현상이 없는 등 비교적 안정성이 높은 화합물 반도체(CdTe, CuInSe₂, GaAs, InP)의 박막태양전지의 연구개발이 활발히 되고 있다. 태양전지의 효율을 높이기 위해서 화합물 반도체등의 p-n 접합 물질 개발도 중요하지만 전도도가 높고 태양빛의 투과율이 좋은 TCO의 개발이 필수적이다. 최근 30% 이상의 높은 효율을 나타내는 multi-junction 구조의 태양전지개발을 위하

여서는 각층의 p-n 접합에 사용되는 n-type 및 p-type TCO의 개발이 필수적이다. 특히 p-type 반도체를 위한 TCO 개발은 태양전지의 효율을 높이기 위해서는 매우 중요하다.

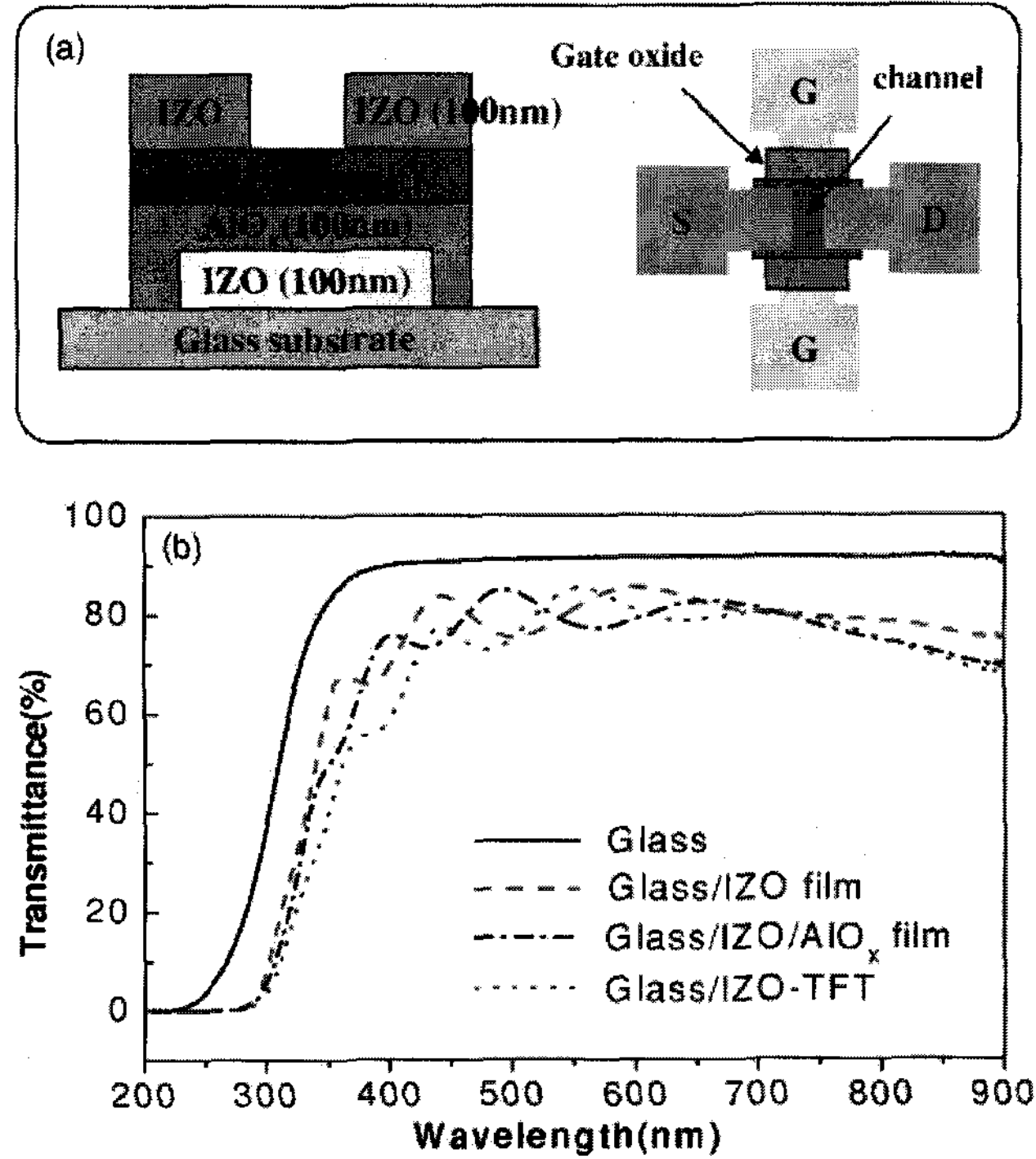
3. Device

지금까지 말해 온 TCO 재료는 ITO가 유기EL의 홀 주입층으로 사용되는 것처럼, TCO로서의 응용이 대부분이며 반도체다운 응용은 거의 없었다. 이러한 주요인은 적당한 투명 p-type 소재를 발견하지 못하여 능동소자로서의 p-n 접합 형성을 실현하지 못했기 때문이다. 투명전도체를 이용하여 p-n 접합을 제조할 경우 UV 발광소자, 투명 트랜지스터, 투명 다이오드 등의 투명 전자소자 분야 및 active channel 소재로의 응용이 가능하기에 기존의 display 투명 소자에 새로운 기능을 부여하고 다양한 특성 연출이 가능하여 p-type 산화물계 투명전도체 개발기술 및 p-n 접합응용 연구는 필수 불가결하다 할 수 있다.

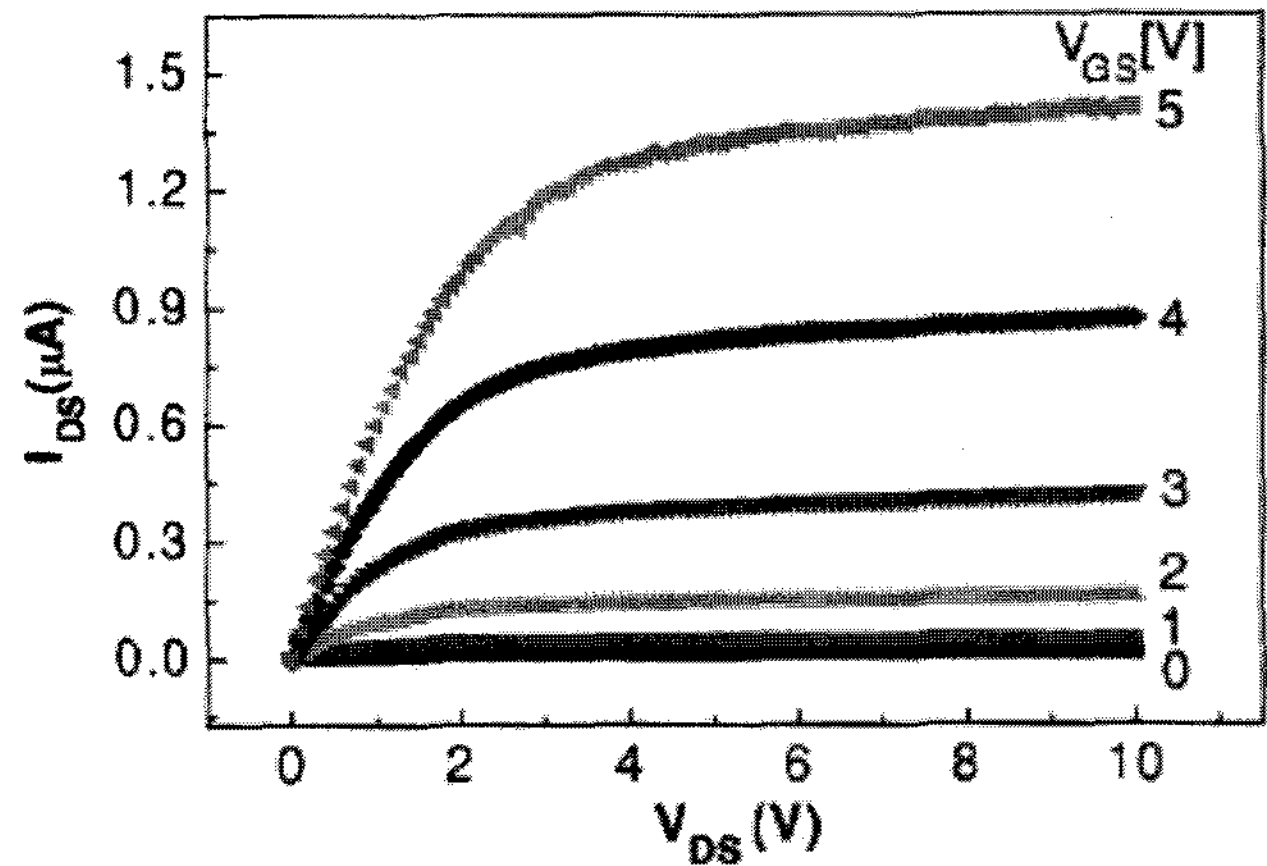
한편 차세대 flat panel display 중의 하나인 Organic LED의 투명 Thin Film Transistor (TFT) 소자개발을 위하여, active channel 소재로서 산화물계 투명전도체를 이용하는 연구가 발표되고 있다. 현재 이 분야에서의 연구는 n-type ZnO, In-Ga-Zn-O계로부터의 amorphous IGZO 등을 이용한 Transparent TFT가 대표적이다.^[27] 최근 본 연구진에서도 소스 및 드레인 전극과 채널용 반도체로 IZO ((In₂O₃) (ZnO)₃)를 사용하여 glass 기판 위에 투명한 TFT를 제작하는데 성공하였다.^[28] IZO 박막은 모두 상온에서 비정질 상으로 증착하였으며, 전극과 채널은 증착시 산소분압을 조절하여 전기전도도를 조절하였다. [그림 7] (a)는 투명 TFT 소자의 모식도를 나타내었다. 채널의 길이(L)는 100 μ m, 길이(L)는 20 μ m로 하여 W/L의 비율을 5로 하여 제작하였다. [그림 7] (b)는 제작한 TFT의 파장에 따른 투과도를 나타내었다. TFT 소자가 완성된 후의 가시광선 영역에서의 투과도는 약 80% 정도를 나타내었다.

[그림 8]은 제작한 TFT의 I-V 곡선을 나타내었다. 드레인 전압은 0-10V까지 인가하였으며, 게이트 전압은 1V 단위로 0-5V까지 인가하여 드레인 전류의 변화를 측정하였다. 드레인 전류는 게이트 전압이 증가함에 따라 증가하였으며, 포화점을 나타내기 시작하는 드레인 전압의 시점이 낮아지는 경향을 나타내어 게이트와 드레인의 전압에 의존하는 n-channel의 전형적인 구동형태와 일치하였다. 드레인 전압이 10V인 경우 게이트 전압을 5V 인가하였을 때 드레인의 포화전류는 약 1.4 μ A인 것으로 나타났다.

TFT는 switching 역할을 하는 디스플레이의 기본회로요소이기에 앞으로 많은 연구가 진행될 것으로 믿어지며 상온에서 플라스틱 기판위에 박막을 성장시키는 기술을 확보하는데 연구가 집중될 것으로 보인다. 그러나, 효율, 안정성 및 재연성 등의 문제를 가지고 있어 ITO의 활발한 산업적 응용과는 다르게 모두 연구초기 단계에 머무르고 있다. 그러나 머지않아 이 분야의 연구 및 산업은 급속하게 각광받을



[그림 7] (a) 투명 TFT 소자의 모식도 (b) 제작된 TFT 소자의 투과도^[28]



[그림 8] 투명 TFT의 전류-전압특성^[28]

것으로 전망되고 있다.

IV. 앞으로의 전망

디스플레이는 세계 시장이 급팽창 중이며 국내업체가 세계적인 경쟁력을 보유한 분야이다. 국내 기업은 디스플레이 분야에서 298억불을 생산, 197억불을 수출함으로써 GDP 대비 4.2%, 전체수출 대비 6.9%를 차지하여 국가 주력산업으로의 위상을 확립하였으며, 평판 디스플레이 시장은 다양한 디스플레이의 신규시장 창출과 함께 고속 성장이 지속될 것으로 예상되어 한국의 평판디스플레이 세계시장 점유

율도 2004년 33.6%에서 2010년 44.1%까지 꾸준히 증가할 것으로 전망된다. 현재 TCO로서 광투광성, 전도성이 우수하고 패터닝성이 유리한 특성을 가진 ITO가 90% 이상을 차지하고 있으나 2004년의 세계적인 In 파동을 기점으로 인해 ITO 대체 소재 및 공정에 대한 요구가 현안으로 대두됨으로써 n-type 투명 전도체의 경우 인듐 가격의 급격한 상승 및 고갈로 인듐 절약형 ITO 및 대체 가능한 소재 개발에 초점이 맞춰질 전망이다. 아울러 OLED, TFT LCD의 transistor active channel 등 새로운 응용분야가 떠오름에 따라 여기서 요구되는 물성을 가진 소재개발이 뒤따라야 할 것이다.

p-type 투명전도체의 경우 지구 화석연료 고갈 및 환경오염 문제로 태양전지 분야에 급격한 수요가 따를 것으로 전망된다. 특히 solar cell efficiency를 증가할 목적으로 solar cell back layer electrode로 널리 사용될 것으로 믿어진다. 아울러 양질의 p-type 투명전도체가 개발되면 기존의 n-type과 조합을 이루어 p-n junction을 이용한 UV 발광소자 이외 p-n junction의 다양한 응용이 가능할 것으로 생각되며 transparent electronic devices로의 응용범위가 한층 넓어질 것으로 기대된다.

현재 디스플레이 소재 및 소자의 세계적인 현주소는 새로운 투명전도체 소재개발을 병행하면서 p-n junction, LED 및 TFT 등 Device 화 단계에 접어들었으며, 이 단계에서 관련 신기술의 급성장과 더불어 수많은 특허가 양산될 것으로 기대되어 국내 연구진들의 발 빠른 대처가 필요할 것으로 생각된다.

V. 감사의 글

이 논문은 2005년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업으로 수행된 연구임(No. M10500000041-06J0000-04110)

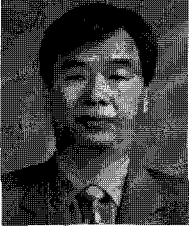
참고 문헌

- [1] I. Hamberg, C.G. Granqvist, *J. Appl. Phys.* 60^[11]R 123 (1986).
- [2] S.J. Wen, G. Counturier, G. Campet, J. Portier, J. Clavier, *Phys. Status Solidi* 130, 407 (1992).
- [3] T.J. Coutts, D.L. Young, X. Li, *MRS Bulletin* 25 (8), pp. 58-65 (2000).
- [4] I. Hamberg and C.G. Granqvist, *J. Appl. Phys.* 60 (11) p.R123 (1986).
- [5] H. Kawazoe, H. Yanagi, K. Ueda, H. Hosono, *MRS Bulletin* 25(8), pp. 28-36 (2000).
- [6] Roy G. Gordon, *MRS Bulletin* 25(8), pp. 52-57 (2000).
- [7] B. Yaglioglu, Y.J. Huang, H.Y. Yeom, D.C. Paine, *Thin Solid Films*, 496(1) pp. 89-94 (2006).
- [8] G.B. Palmer, K.R. Poeppelmeier, T.O. Mason, *Chem. Mater.* 9, p. 3121 (1997).
- [9] A. Ambrosini, G.B. Palmer, A. Maignan, K.R. Poeppelmeier, M.A. Lane, P. Brazis, C.R. Kannewurf, T. Hogan, T.O. Mason, *Chem. Mater.* 14, p. 52 (2002).
- [10] A. Ambrosini, S. Malo, K.R. Poeppelmeier, M.A. Lane, C.R. Kannewurf, T.O. Mason, *Chem. Mater.* 14, p. 58 (2002).
- [11] K.H. Seo, D.H. Park, J.H. Lee, J.J. Kim, *Solid State Ionics* 177, pp. 601-605 (2006).
- [12] T. Yamamoto, *Thin solid Films* 420-421, pp. 100-106 (2002).
- [13] K.Y. Son, D.H. Park, J.H. Lee, J.J. Kim, J.S. Lee, *Solid State Ionics*, 172(1-4) pp. 425-429 (2004).
- [14] D.H. Park, K.Y. Son, J.H. Lee, J.J. Kim, J.S. Lee, *J. Solid State Ionics* 172, p. 431 (2004).
- [15] T. Hitosugi, A. Ueda, T. Hasegawa, *Ceramics Japan*, 42(1) pp. 32-36 (2007).
- [16] S. Matsuishi, Y. Toda, M. Miyakawa, K. Hayashi, T. Kamiya, M. Hirano, I. Tanaka and H. Hosono. *Science* 301, 626 (2003).
- [17] H. Kawazoe, M. Yasukawa, H. Hyodo, M. Kurita, H. Yanagi and H. Hosono. *Nature* 389, 939 (1997).
- [18] Y. Wang, H. Gong, F. Zhu, L. Liu, L. Huang and A. C.H. Huan. *Mater. Sci. Engin. B* 85, 131 (2001).
- [19] K. Ueda, T. Hase, H. Yanagi, H. Kawazoe, H. Hosono, H. Ohta, M. Orita and M. Hirano. *J. Appl. Phys.* 89, 1790 (2001).
- [20] A. Kudo, H. Yanagi, H. Hosono, H. Kawazoe, *Appl. Phys. Lett.* 73, 220 (1998).
- [21] E. Bobeico, F. Varsano, C. Minarini and F. Roca, *Thin Solid Films* 44, 70 (2003).
- [22] H. Kawazoe, H. Yanagi, K. Ueda, and H. Hosono, *MRS bulletin* 25, 28 (2000).
- [23] A.N. Banerjee, R. Maity and K.K. Chattopadhyay, *Materials Letters* 58, 10 (2004).
- [24] A.N. Banerjee, S. Kundoo and K.K. Chattopadhyay, *Thin Solid Films* 440, 5 (2003).
- [25] H. Yanagi, T. Hase, S. Ibuki, K. Ueda, H. Hosono, *Applied Physics Letters*, 78 (11) pp. 1583-1585 (2001).
- [26] M. Joseph, H. Tabata and T. Kawai, "P-type electrical conduction in ZnO thin films by Ga and N codoping", *Jpn. J. Appl. Phys.* 38, pp. 1205-1207 (1999).
- [27] W.J. Lee, J. Kang, K.J. Chang, *Physica B: Condensed Matter*, 376-377 pp. 699-702 (2006).
- [28] K. Nomura, H. Ohta, A. Takagi, T. Kamiya, M.

Hirano, H. Hosono, *Nature*, 432, pp.488-492 (2004).

[29] J.I. Song, J.S. Park, H.W. Kim, Y.W. Heo, J.H. Lee, J.J. Kim, G.M. Kim, B.D. Choi, *Applied Physics Letters* 90, 022106 (2007).

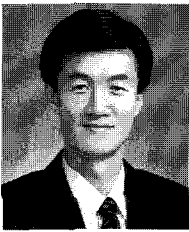
저 자 소개



김 정 주

1983. 2 서울대학교 무기재료공학 학사,
1985. 2 서울대학교 무기재료공학 석사,
1988. 2 서울대학교 무기재료공학 박사,
1991~1992 : Leheigh University 교
환교수, 1988. 3~현재 : 경북대학교 무
기재료공학과 교수, 1996~현재 : 한국

세라믹학회 편집위원, 2006. 8~현재 : 재료연구정보센터 센
터장



이 준 형

1989. 2 영남대학교 전자공학 학사,
1991. 2 경북대학교 무기재료공학 석사,
1995. 2 경북대학교 무기재료공학 박사,
1995~1996 : 미국 MIT 재료공학과
Post~Doctoral Fellow, 2002. 3~현
재 : 경북대학교 무기재료공학과 조교수