2013
Electronics and
Telecommunications
Trends

미래 부품소재기술 특집

플렉서블 일렉트로닉스용 투명합성전극 기술 동향

Transparent Composite Electrodes Technology for Flexible Electronics

조경익 (K.I. Cho) 유연인터페이스연구실 책임연구원
구재본 (J.B. Koo) 유연인터페이스연구실 실장
추혜용 (H.Y. Chu) 차세대디스플레이연구단 단장
T.L. Alford Graduate Program Chair and Professor, Materials Science & Engineering, School for Engineering of Matter, Transport and Energy, Arizona State University, USA

Ⅰ. 서론
Ⅱ. 소재의 선택
Ⅲ. 전기 전도
Ⅳ. 광 투과
Ⅴ. 성능 지수
Ⅵ. 기계적 · 열적 · 습도 안정성
Ⅶ. 소자 응용
Ⅷ. 결론

대면적 태양전지와 디스플레이용 투명전극으로 지금까지는 투명전도성산화물(TCO: Transparent Conductive Oxide)이 일반적으로 사용되어 왔지만, 성능이 향상된 새로운 소자가 등장함에 따라 현재보다 우수한 광학 특성을 가지면서 낮은 전기저항을 갖는 새로운 투명전극을 개발하기 위한 관심이 집중되고 있다. 다양한 종류의 차세대 투명전극 기술 중 현재 응용 가능성이 가장 높은 투명합성전극(TCE: Transparent Composite Electrode, TCO/금속/TCO 구조) 기술은 단일 층 TCO를 사용하는 것보다 우수한 전기·광학적 특성을 보여주고, 더구나 플라스틱 기판 위에 저온에서도 공정이 가능하기 때문에 새로운 투명전극 기술로 부상하게 되었다. 본고에서는 투명합성전극 기술에 대해 소재의 선택, 전기·광학적 특성, 기계적·열적·습도 안정성과 소자 응용 관련 주요 현황에 대해 살펴보고자 한다.

© 2013 한국전자통신연구원

Ⅰ. 서론

투명전도성산화물(TCO:Transparent Conductive Oxide)은 평판디스플레이, 터치패널, 태양전지 및 일렉트로크로믹(electrochromic) 소자 등과 같은 광감응(photosensitive) 전자소자에서 전극 소재로 광범위하게 사용되고 있는 IT 산업의 핵심 소재이다[1]-[3]. TCO는 가시광 영역에서 높은 광투과도(~80% 이상) 및 낮은 비저항(~10^{-3}Ωcm 이하)을 갖고 있으며, 실제 TCO는 응용에 따라 요구되는 특성이 광범위하다[3]. 우선 면저항(sheet resistance) 값을 살펴보면, 터치 패널용 전극으로는 400-700Ω/sq 정도가 요구되며, 대면적 평판디스플레이와 박막태양전지에서는 10Ω/sq 이하의 면저항이 요구된다. 광투과도(optical transmittance)를 살펴보면, TCO는 일반적으로 3.1eV 이상의 밴드갭(band gap)을 갖고 있어 400nm 이상의 파장에서 투명하고 박막형태에서 가시광의 80% 이상을 투과시키며, 또한 TCO는 10^{20}-10^{21}cm^{-3} 정도의 전하(carrier) 농도를 얻을 수 있도록 축퇴형 도핑(degenerate doping)이 쉬워야 한다. 일반적으로 TCO는 산소 원자공(vacancy) 또는 격자간(interstitial) 금속 원자들에 의한 내적(intrinsic) 도핑과 불순물에 의한 외적(extrinsic) 도핑으로 이루어진 축퇴형 n-형 반도체(degenerate n-type semiconductor)이다.

지금까지 가장 널리 사용된 TCO는 스퍼터 공정에 의해 제작된 ITO(Indium Tin Oxide, In_2O_3:Sn)이다. ITO는 250℃ 이상에서 증착되었을 때 3.7eV의 밴드갭과 2×10^{-4}Ωcm 정도의 비저항을 갖는 아주 우수한 투명전극 소재이다[3]. 그러나 인디움(In)은 감소되는 공급과 평판디스플레이 시장의 확대되는 수요의 결과로 점점 비싸지게 되었다. 이러한 요인들이 ITO 성능 이상을 만족시키면서 쉽게 구할 수 있는 새로운 투명전극을 개발할 필요성을 불러 일으켰다.

최근에는 플렉서블(flexible) OLED(Organic Light Emitting Diode) 및 유기태양전지(OPV: Organic Photovoltaic)와 같은 플렉서블 광전소자의 급격한 발달에 따라, 기존의 유리 기판이 아닌 플렉서블(유연)한 기판 위에 제작이 가능한 플렉서블 투명전극 기술이 상당한 관심을 끌고 있다. 기존 ITO 전극의 경우 기판의 휨에 대한 기계적 특성이 약하여 이를 대체하기 위해 낮은 전기저항 및 높은 광투과 뿐만 아니라 뛰어난 유연성을 가진 고품질의 플렉서블 투명전극의 개발이 중요하게 되었다.

그리하여 In이 감소된(reduced In) 또는 In이 없는(In-free) TCO가 가능한 대안으로 연구되고 있다. In이 감소된 TCO로는 IZO(Indium-Zinc Oxide) 및 IGZO(Indium-Gallium-Zinc Oxide) 등이 있으며, In이 없는 TCO로는 ZnO(Zinc Oxide), AZO(Aluminum-doped Zinc Oxide), GZO(Gallium-doped Zinc Oxide) 등이 있다. 보다 특수한 대안으로 전도성 탄소 기반의 TCO가 있다. 그러나 많은 실제적인 응용에 대해, 앞에서 언급한 TCO들은 너무 높은 비저항 값을 갖고 있다.

전체적인 전기전도도를 향상시킬 수 있는 한 가지 접근방법은 두 개의 TCO 층 사이에 얇은 금속 층을 삽입함으로써 투명합성전극(TCE: Transparent Composite Electrode, TCO/금속/TCO구조)을 제작하는 것으로, 여기서 다층 TCE의 전체 두께는 단일 층 TCO의 두께보다 작다. 예를 들어, 전체 두께가 100nm 이하인 ITO/Ag/ITO 구조의 경우 5Ω/sq 이하의 면저항과 85% 이상의 광투과도가 얻어진다. 반면 2×10^{-4}Ωcm의 비저항을 갖는 단일 층 ITO의 경우 동일한 면저항 값을 얻기 위해서는 400nm 이상의 두께가 요구된다. 이렇듯 단일 층 TCO 대신 TCO/금속/TCO 구조의 다층 TCE를 사용할 경우, 소재 선택 및 소재 절감 측면에서의 장점을 가질 뿐만 아니라, 최적의 전기전도도가 기판의 가열 없이 얻어질 수 있기 때문에 공정온도를 낮출 수 있는 장점을 가진다[2][3].

그리하여 다층 TCE 구조를 사용할 경우 저온 공정의

장점으로 인해 플라스틱 기판 위에서도 우수한 특성의 투명전극 형성이 가능하며, 또한 소재 선택의 폭이 다양하기 때문에 전기전도도와 광투과도 이외에 특수 응용에 부합하게 다른 특성인 일함수(work function), 표면형태(morphology), 굽힘성형성(bendability), 내부식성(corrosion resistance) 등을 단일 층 TCO를 사용할 때보다 쉽게 만족시킬 수 있게 된다. 아울러 다층 TCE 공정의 기존 ITO 공정과의 호환성은 실제 응용 측면에서 매우 큰 장점 중의 하나이다.

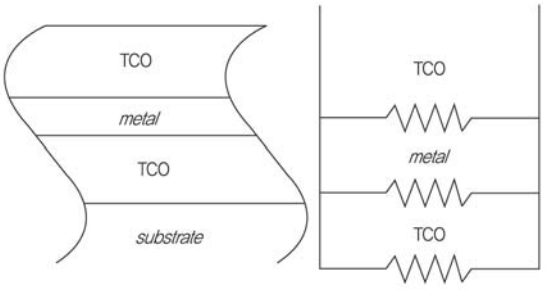
II. 소재의 선택

다층 TCE의 전체적인 전기·광학적 특성은 다음과 같은 요인에 의해 결정된다[2]. TCO의 종류 및 두께, 금속층의 종류 및 두께와 표면형태, 금속과 TCO 사이의 계면 반응이 그것이다. TCO와 금속층의 저항은 박막 형성 조건에 따라 크게 달라진다. 금속층은 우수한 전기전도도와 광투과도를 가지기 위해 연속적으로 형성되어야 한다. TCO 층은 가시광 영역에서 우수한 광투과도를 가져야 하며 금속층과 접촉되었을 때 반반사층(antireflection layer)으로서 역할을 해야 한다.

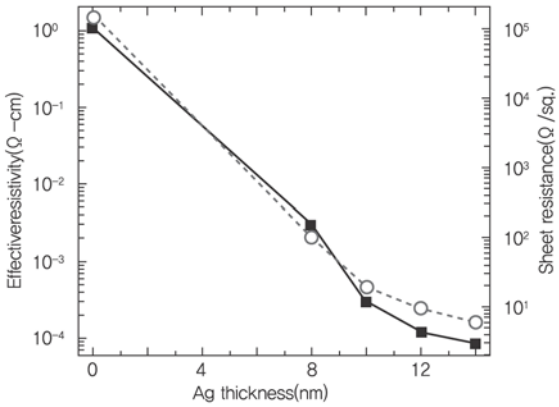
전형적인 TCO/금속/TCO 구조의 TCE에서 상·하 TCO 층의 두께가 대략 30-60 nm를 가질 때 약 550nm 파장에서 광투과도는 최대가 된다[3]. 금속으로는 전기저항이 낮기 때문에 Ag, Cu, Au 등이 주로 사용된다. 체적소재(bulk material)에서 Ag와 Cu의 비저항 값은 각각 1.6μΩcm와 1.7μΩcm인 반면, 박막상태에서 Ag와 Cu의 비저항 값은 각각 6μΩcm과 9μΩcm정도이다(즉, 6Ω/sq의 면저항을 얻기 위해 Ag 박막의 두께는 10 nm, Cu 박막의 두께는 15 nm이어야 한다).

TCO/금속/TCO 구조에서 TCO 층의 주된 역할은 금속층 표면으로부터의 반사(reflection)를 감소시킴으로써 가시광 영역에서 전체적인 광투과도를 증가시키는 것이다. 금속 박막에서의 투과도의 한계는 주로 반사손실(reflectance loss)에 의한 것으로 반반사층을 금속 층 표면에 도포함으로써 투과도를 향상시킬 수 있다. 그러나 최대의 투과도(최소의 반사)를 얻기 위해서는 서로 다른 계면에서의 다중 반사들 사이에 일어나는 간섭현상을 조절할 필요가 있다. 통상적으로 30-60nm 두께의 TCO 박막이 사용되며, 투과도를 최대로 하기 위해 각 구성 성분의 두께와 굴절계수(refractive index) 및 감쇄계수(extinction coefficient) 등에 기반한 시뮬레이션들이 사용된다. TCO 층의 광학적 특성은 박막 두께 및 산소량에 크게 의존하며, TCO의 굴절계수가 클수록 금속층 위에서 더 좋은 반반사효과(antireflective effect)를 나타내는 것으로 알려져 있다[3]. 또한 TCO 박막에서 결정립 크기는 박막 두께에 의존하는데, 결정립 크기가 작고 두께가 얇은 박막에서 밴드갭 에너지가 커지는 것으로 보고되고 있다[3].

(그림 1)은 TCE의 구조 및 등가회로의 도식도이다. TCE의 총 저항은 세 층의 병렬연결의 결과라고 가정하면, TCE의 유효비저항(ρ_{TCE}: effective resistivity)은 $\rho_{TCE} = R_{sh} \times t_T$와 같으며, 여기서 R_{sh}는 4-포인트프로브(4-point probe)로 측정한 TCE의 전체의 면저항이며, t_T는 다층 TCE의 총 두께이다. 상·하 TCO 층이 동일한 비저항과 두께를 가질 경우, $1/R_{sh} = 1/R_{metal} + 2/R_{TCO}$ 가 된다. 만일 $R_{TCO} = 100R_{metal}$ 인 전형적인 경우, $R_{sh} = R_{metal}/1.02 \approx R_{metal}$ 이 되어, TCE 전체의 면저항은 금속층의 면저항에 의해 결정됨을 알 수 있다.



(그림 1) TCE의 구조 및 등가회로의 도식도[2].



(그림 2) PEN 기판 위 ZnO/Ag/ZnO TCE에서 Ag 층의 두께가 TCE의 유효비저항과 면저항에 미치는 영향[2].

(그림 2)는 TCE 구조에서 금속층의 두께가 TCE의 유효비저항과 면저항에 미치는 영향을 보여 주는 예로써, 금속층의 삽입으로 인해 TCE 전체의 전도성이 엄청나게 향상되는 것을 알 수 있다.

다층 TCE는 낮은 유효비저항 및 높은 광투과도를 가지는 것에 더하여, 특수 응용에 따라 여러 가지 요인(일함수(work function), 물리・화학・열적 안정성, 식각특성(etchability), 플라즈마 파장(plasma wavelength), 공정온도, 비용 등)을 고려하여 선택되어야 한다[1]. 흔히 인접층의 에너지 준위(energy level)에 대해 적절한 일함수(Φ)을 갖는 TCE를 선택하게 되는데, 그것은 대부분 접촉 계면(contact interface)이 전하 수송(carrier transport)에 대해 가능한 한 낮은 장벽(barrier)을 가질 필요가 있기 때문이다. Ag, Cu, Au의 일함수는 각각 Φ_{Ag} = 4.4eV, Φ_{Cu} = 4.6eV, Φ_{Au} = 5.1eV이며, 이것들은 ZnO의 일함수 Φ_{ZnO} = 5.16-5.3eV 값보다 작다[2]. 이상적으로 이러한 금속층이 TCO와 접촉하게 될 때 평형상태에서 페르미 준위(Fermi level)가 정렬(align)하게 되고 전자들은 금속으로부터 TCO 층 속으로 재배치된다. 금속-TCO 계면에서 밴드 휨(band bending)의 결과로써, TCO 층에 다수 전하인 전자들의 축적(accumulation)으로 오믹접촉(Ohmic contact)이 형성된다. 이 경우, 전자가 금속층과 TCO 사이에 흐르는데 아무런 장벽도 없게 되며, 따라서 전자들이 금속층으로부터 TCO 층으로 쉽게 주입된다.

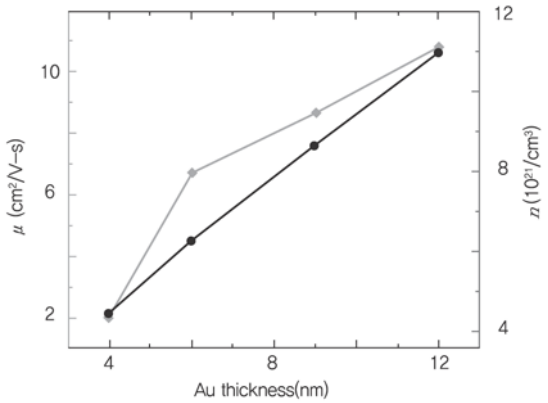
Ⅲ. 전기 전도(Electrical conduction)

다층 TCE에 사용되는 TCO가 높은 전하 농도를 가진 축퇴형 반도체라고 할 때, 이들의 전기전도도는 보통 이온화된 불순물 산란(ionized-impurity scattering)에 의해 지배된다. TCE에 대한 그 동안의 연구에 의하면 전기전도의 대부분은 금속층에서 이루어진다. 금속층 두께가 증가함에 따라 TCE의 유효비저항(ρ_{TCE})의 감소는 다음 식과 같이 전하 농도(n) 및 홀이동도(Hall mobility: μ)에 의해 기인한다.

$$\rho_{TCE} = 1/(ne\mu)$$

(그림 3)은 TCE 구조에서 홀 이동도 및 전하 농도가 금속층의 두께에 의해 어떻게 변하는가를 보여 주는 예이다.

다층 TCE의 물리적 구조((그림 1) 참조)는 TCE에서 본질적으로 부피 대비 계면 면적의 비율이 크며, 따라서



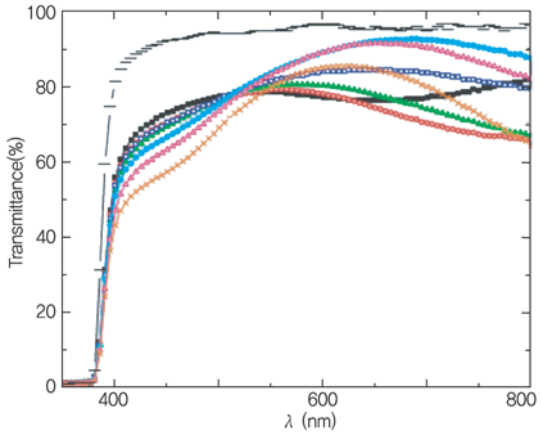
(그림 3) ZnO/Au/ZnO TCE에서 Au 층의 두께가 홀 이동도 및 전하 농도에 미치는 영향[2]

우세한 산란 메카니즘은 표면 산란(surface scattering)이라는 것을 보여준다. 금속층에서 결정립 크기가 증가함에 따라 결정립계 면적이 감소하게 되고, 결국 이동도의 증가로 나타난다. 연속적인 금속층이 형성되기 시작하는 어떤 임계 두께(critical thickness)보다 작을 때에는 결정립계 산란(grain-boundary scattering)이 우세한 반면, 그 이상일 경우에는 계면 산란(interface scattering)이 우세하다[2].

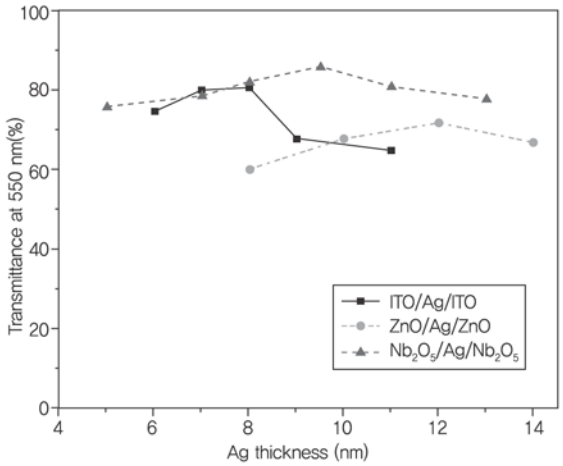
Ⅳ. 광 투과(Optical transmission)

(그림 4)는 다층 TCE 구조에서 금속층의 두께가 다른 경우에 대해 파장에 따른 광투과도 스펙트럼을 보여 주는 예이다. 도핑하지 않은 ZnO 박막의 광투과도는 가시광 영역에서 약 90%이다. TCE 구조에서 금속층의 삽입으로 인해 TCE의 평균 광투과도는 금속층의 두께에 따라 75-85%로만 감소한다[2].

(그림 5)는 다양한 TCE 구조에 대해 550nm 파장에서의 광투과도를 금속층의 두께의 함수를 보여 주는 예로써, 광투과도는 금속층의 두께가 증가함에 따라 처음에는 증가하다가 어느 두께 이상에서는 감소하게 된다.



(그림 4) ZnO/Au/ZnO TCE에서 Au 층의 두께가 다른 경우에 대해 파장에 따른 광투과도 스펙트럼[2].



(그림 5) 다양한 TCE 구조에 대해 금속층의 두께에 따른 550nm 파장에서의 광투과도[2].

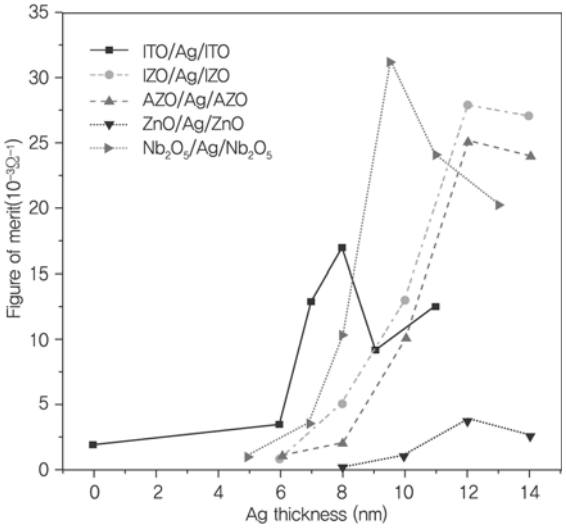
Ⅴ. 성능 지수(Figure of merit)

투명전극의 경우 일반적으로 전극의 두께에 따라 전기전도도와 광투과도가 서로 상충관계를 갖는다. 이에 따라 투명전극의 특성을 비교하기 위해 여러 가지 성능지수(FOM: Figure of Merit, φ_{TC})가 제안되었는데, 이 중 Haake[4]가 정의한 성능지수는 다음과 같다.

$$\varphi_{TC} = T_{av}^{10}/R_{sh}$$

여기서 T_{av}는 평균 투과도이며 R_{sh}는 면저항이다.

(그림 6)은 다양한 TCE 구조에 대해 금속층의 두께에 따른 FOM 값을 보여 주는 예이다. 이 그림에서 보면 다양한 TCE 구조에 대해 금속(Ag)층이 연속적으로 되기 시작할 때 최고의 FOM 값이 얻어진다. 단일 층의 ITO보다 ITO/Ag/ITO에서 Ag 층의 삽입으로 FOM 값이 크게 향상되어 나타난다. 또한 Nb_2O_3/Ag/Nb_2O_3 구조가 우수한 FOM 값을 보여 주는 TCE 중의 하나로 보이며, 향후 태양전지 및 다른 디스플레이에 응용 가능성이 클 것으로 전망된다[2]. 최근에 TiO_2/Ag/TiO_2 구조의 경



(그림 6) 다양한 TCE 구조에 대해 Ag 층의 두께에 따른 FOM 값[2]

우, 61.4x10^{-3} Ω^{-1}이라는 엄청나게 큰 FOM 값을 보여주어 유망 TCE로 주목되고 있다[5].

VI. 기계적 · 열적 · 습도 안정성

플렉서블 기판 위에서 TCO/금속/TCO 구조의 TCE가 단일 층 TCO보다 우수한 기계적 신뢰성을 갖는 것으로 알려져 있다[6]. TCO/금속/TCO 구조에서 금속층은 그 위의 TCO 박막을 결정화 시키는데 영향을 주며, 박막의 결정성이나 밀도에 의해 TCE의 기계적 특성이 영향을 받는다[3].

일반적으로 상온에서 증착된 TCO 박막의 전기적, 광학적 및 기계적 특성을 향상시키기 위해 진공 또는 질소 분위기에서 300-400 ℃의 열처리가 사용된다. 다양한 구조의 다층 TCE에 대해서 200-400 ℃에서 진공 또는 질소 분위기에서의 열처리 후 전기·광학적 특성이 향상되는데, 이것은 TCO와 금속층의 결정립 성장과 관련이 있다. 그러나 450 ℃ 이상에서 열처리할 경우, 전기·광학적 특성의 열화가 관찰되는데, 진공 또는 질소분위기에서보다 공기 중 또는 산소 분위기에서 특성 열화가 보다 급격하게 일어나며, 이것은 열처리 중 산소의 확산에 의한 금속의 순도(purity) 감소와 금속 원자들의 응집(agglomeration)에 의한 것으로 보고되고 있다[3].

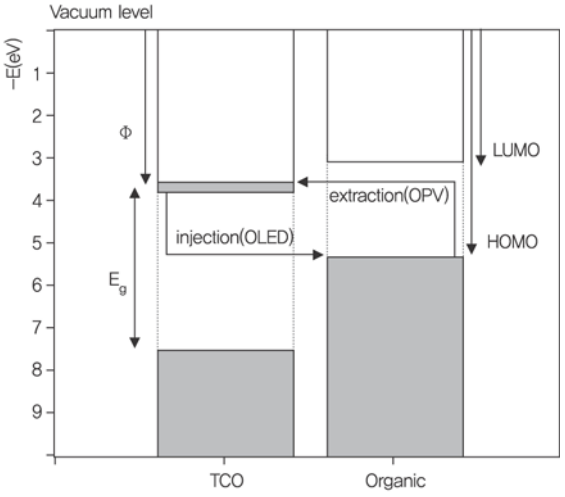
열처리 중 금속 원자들의 응집을 억제하는데 금속층 위에 있는 TCO 층이 금속의 표면 확산을 억제하는데 효과가 있으며, 특히 Ag 금속에 Pd 또는 Cu를 소량(1-2 wt.%) 첨가한 합금 금속의 경우 응집현상을 크게 억제함으로써 열적 안정성을 현저하게 개선시킨다[7]. 습도(humidity)에 의한 열화현상도 위에서 언급한 열적 열화현상과 유사하며, 합금 금속을 사용할 경우 크게 개선된다[8].

VII. 소자 응용

적당한 광투과도와 면저항 값은 다양한 TCO/금속/TCO 조합으로 얻어질 수 있지만, 특수 응용을 위한 가장 좋은 전극의 선택은 응용하고자 하는 소자 구조에서 인접층의 에너지준위와 관련하여 TCO의 일함수에 의해 좌우된다. 그것은 접촉 계면이 전하 수송(carrier transport)에 대해 가능한 한 최소의 장벽을 가져야 하기 때문이다.

OLED와 OPV 소자 응용에 대해, 다층 TCE는 일반적으로 양극으로 사용되는데, 이 구조에서 두 층 이상의 유기층이 양극의 상층 TCO와 음극으로 작용하는 또 다른 금속 사이에 적층된다. 한편, 단일층 TCO를 사용하는 반투명 OLED에서 다층 TCE를 음극으로 사용한 예도 있다[9].

TCO와 인접한 유기층 사이의 밴드 정렬(band alignment)이 소자 특성을 결정하는데 핵심 역할을 한다. 그러나, (그림 7)에 나타낸 전하 주입(carrier injection)과 전하 추출(carrier extraction) 메커니즘에 의하면 OLED와 OPV는 다르게 고려되어야 한다.



(그림 7) TCO 양극과 인접한 유기물질 사이의 밴드 다이아그램을 나타낸 도식도[3].

OLED의 경우에 TCO/유기층 계면의 핵심 변수는 전극과 유기 반도체 사이의 전하 주입 장벽으로, 이것은 전극의 일함수와 유기층의 최고점유분자궤도함수(HOMO: Highest Occupied Molecular Orbital) 사이의 에너지 차이에 의해 결정되며, 전하가 전극으로부터 HOMO로 이동하는 전하 주입이 이루어진다. 반면, OPV의 경우에는 전하가 HOMO로부터 전극의 페르미 준위로 이동하는 전하 추출이 일어난다. 즉, TCO 양극은 OLED에서는 정공 주입에 OPV에서는 정공 추출에 사용된다. 실제로 TCO/유기층 계면에서 에너지 장벽은 전하 주입과 추출 모두에 대해 가능한 한 최소가 되도록 해야 한다.

〈표 1〉은 OLED 소자에 다층 TCE를 응용한 경우의 특성을 보여 주는 예로서, 단일 층 TCO를 사용한 경우와 함께 나타내었다. 다층 TCE를 사용한 OLED의 경우 전류밀도 및 휘도(luminance)가 동일 전압에서 단일 층 TCO를 사용하는 경우보다 크게 나타난다. 모든 것이 동일하다고 할 때, TCE의 낮은 일함수는 전극과 활성유기층 사이의 에너지 장벽을 줄여준다. TCE의 낮은 전기저항으로 인해 양극에서 오믹손실의 감소는 고휘도 디스플레이와 순간적으로 고휘도가 필요한 수동형 디스플레이에 유리하며, 플렉서블 기판 위에 제조된 소자의 경우에는 열발생 및 구동전압을 낮추면서도 향상된 소자 특성을 나타내는 등의 이점을 준다[2][3].

〈표 2〉는 OPV 소자에 다층 TCE를 응용한 경우의 특성을 보여 주는 예로서, 단일 층 TCO를 사용한 경우와 함께 나타내었다. OPV에서 광활성 유기층(photoactive

〈표 1〉 TCO/금속/TCO 구조의 투명전극을 OLED 소자에 응용한 경우의 특성[3] L: 휘도(luminance), CE: 전류효율(current efficiency), PE: 전력효율(power efficiency).

Anode description	J(mA/cm^2)	V(V)	L(cd/m^2)	CE(cd/A)	PE(cd/W)
ITO 37nm/Ag(PdCu)8nm/ITO 37nm	550	13	38.000		
ITO	350	13	29.000		
AZO 40nm/Ag(PdCu)8nm/AZO 40nm	–	–	–	–	–
ITO 40nm/Ag 10nm/ITO 40nm	300	8.9		4.5	0.51
ITO	300	10.3		4.5	0.44
IZO 30nm/Ag 12nm/IZO 30nm	200	12	10.000		
ITO	20	12	800		
ITO 50nm/Ag 14nm/ITO 50nm	125	11	5040	4.1	0.37
ITO 100nm	17	11	450	2.6	0.24
IZTO 30nm/Ag 14nm/IZTO 30nm	47	11	10.000		
ITO	33	11	7000		
ITO 50nm/Ag 17nm/ITO 50nm	300	4.9		1.6	0.33
ITO 150nm	300	5.8		1.3	0.22

〈표 2〉 TCO/금속/TCO 구조의 투명전극을 OPV 소자에 응용한 경우의 특성[3] J_{sc}: 단락전류(short circuit current), V_{oc}: 개방전압(open circuit voltage), *FF*: 충진율(fill factor), *PCE*: 전력변환효율(power conversion efficiency).

Anode description	Active layer	J_{sc}(mA/cm^2)	V_{oc}(V)	FF	PCE(%)
ITO 40nm/Ag 10nm/ITO 40nm	P3HT:PCBM	8.49	0.56	0.69	3.26
ITO 40nm/Cu 14nm/ITO 40nm		7.11	0.56	0.70	2.78
ITO 80nm		7.41	0.50	0.46	1.72
AZO 40nm/Cu 12nm/AZO 40nm	P3HT:PCBM	9.41	0.50	0.46	2.14
AZO 500nm		9.20	0.48	0.31	1.36
GZO 40nm/Cu 12nm/GZO 40nm	P3HT:PCBM	9.86	0.54	0.53	2.84
GZO 500nm		8.00	0.50	0.39	1.57
ITO 40nm/Ag 12nm/ITO 40nm	P3HT:PCBM	9.30	0.56	0.72	3.73
ITO 80nm		9.61	0.54	0.62	3.21
ITO 70nm/Ag 14nm/ITO 70nm	P3HT:PCBM	9.58	0.51	0.39	2.00
ITO 150nm		3.33	0.39	0.35	0.48
IZO 40nm/Ag 14nm/IZO 40nm	P3HT:PCBM	8.13	0.54	0.69	3.05
IZO 40nm/Ag 12nm/IZO 40nm		7.04	0.56	0.68	2.66
ITO 40nm/Ag 16nm/ITO 40nm	P3HT:PCBM	9.22	0.54	0.65	3.25
ITO 150nm		7.53	0.55	0.56	2.35
ITO 50nm/Ag 8nm/ITO 50nm	CuPc-C_{60}	2.89	0.47	0.40	0.57
ITO 100nm		2.81	0.47	0.37	0.52

organic layer)의 흡수영역(absorption region)에서 전극의 높은 광투과도는 OPV의 효율을 향상시킨다. OPV에 다층 TCE를 사용한 경우 높은 광투과도 및 낮은 면저항 효과 때문에 단일층 TCO 전극을 사용한 경우에 비해 높은 전력변환효율(PCE: Power Conversion Efficiency)을 나타낸다. 태양전지의 전력변환효율(PCE)은 다음과 같이 계산된다[3].

$$PCE = P_{out} / P_{in} = V_{oc} J_{sc} FF / P_{in}.$$

VIII. 결론

본고는 다양한 종류의 차세대 투명전극 중 현재 응용 가능성이 가장 높은 TCO/금속/TCO 구조의 다층 TCE에 대한 기술 동향을 살펴보았다. 다층 TCE는 감소된 박막 두께로써 높은 광투과와 우수한 전기전도 특성을 얻을 수 있기 때문에 단일 층 TCO를 대체하는데 유망하다. 단일 층 TCO에 비해 향상된 전기적·광학적 특성을 얻기 위해 다양한 금속들(Ag, Cu, Au)과 함께 다양한 TCO들(In-based, In-reduced, In-free)이 사용되고 있다. 특히 플라스틱 기판 위에서 저온 공정으로도 다층 TCE들은 우수한 광투과 및 전기전도 특성을 보여주고 있으며, 이는 유기물 기반의 OLED 및 OPV 소자들을 넓은 면적의 플렉서블 기판 위에 제작 가능하게 한다. 향후, 이러한 다층 TCE의 장점을 활용한 다양한 플렉서블 소자 응용과 함께 기계적 특성 및 신뢰성 향상에 대한 연구와 더 나아가 R2R(Roll-to-Roll) 제조공정에 적용하기 위한 광범위한 연구가 필요하다.

용어해설

TCO(Transparent Conductive Oxide) 가시광을 흡수하지 않고 투과하여 투명하면서도 전기전도성이 우수한 산화물로서, ITO가 대표적인 물질이며, 디스플레이, 박막태양전지 및 터치패널 등에 투명한 전극 물질로 사용됨.

TCE(Transparent Composite Electrode: TCO/금속/TCO 구조) 투명전극 물질 중 대표적인 ITO의 In을 사용하지 않거나 In을 감소시키기 위해, 두 개의 TCO 층 사이에 얇은 금속 층을 삽입함으로써, 우수한 광투과도와 전기전도도를 향상시킬 수 있는 차세대 유망 투명전극 기술

약어 정리

AZO	Aluminum-doped Zinc Oxide
CE	Current Efficiency
FF	Fill Factor
FOM	Figure of Merit
GZO	Gallium-doped Zinc Oxide
HOMO	Highest Occupied Molecular Orbital
IGZO	Indium-Gallium-Zinc Oxide
ITO	Indium Tin Oxide
LUMO	Lowest Unoccupied Molecular Orbital
OLED	Organic Light Emitting Diode
OPV	Organic Photovoltaic
PCE	Power Conversion Efficiency
PE	Power Efficiency
R2R	Roll-to-Roll
TCE	Transparent Composite Electrode
TCO	Transparent Conductive Oxide

참고문헌

[1] R. G. Gordon, "Criteria for choosing transparent conductors," Materials Research Society Bulletin 25, 52 (2000).

[2] T. L. Alford, "Transparent composite electrodes for future flexible photovoltaic applications," TMS2013 Annual Meeting Supplemental Proceedings, 183 (2013).

[3] C. Guillén, J. Herrero, "TCO/metal/TCO structures for energy and flexible electronics," Thin Solid Films 520, 1 (2011).

[4] G. Haacke, "New figure of merit for transparent conductors," J. Appl. Phys. 47, 4086 (1976).

[5] A. Dhar, T. L. Alford, " High quality transparent TiO_2/Ag/TiO_2 composite electrode films deposited on flexible substrate at room temperature by sputtering," APL Mater. 1, 012102 (2013).

[6] Y. S. Park, K. H. Choi, H. K. Kim, "Room temperature flexible and transparent ITO/Ag/ITO electrode grown on flexile PES substrate by continuous roll-to-roll sputtering for flexible organic photovoltaics," J. Phys. D: Appl. Phys. 42, 235109 (2009).

[7] H. S. Roh, S. H. Cho and W. J. Lee, "Study on the durability against heat in ITO/Ag-alloy/ITO transparent conductive multilayer system," Physica Status Solidi A 207, 1558 (2010).

[8] S. W. Chen, C. H. Koo, H. E. Huang, C. H. Chen, "Ag-Ti alloy used in ITO-metal-ITO transparency conductive thin film with good durability against moisture," Mater. Trans. 46, 2536 (2005).

[9] S. Y. Ryu, J. H. Noh, B. H. Hwang, C. S. Kim, S. J. Jo, J. T. Kim, H. S. Hwang, H. K. Baik, H. S. Jeong, C. H. Lee, S. Y. Song, S. H. Choi, .S. Y. Park, "Transparent organic light-emitting diodes consisting of a metal oxide multilayer cathode," Appl. Phys. Lett. 92, 023306 (2008).